

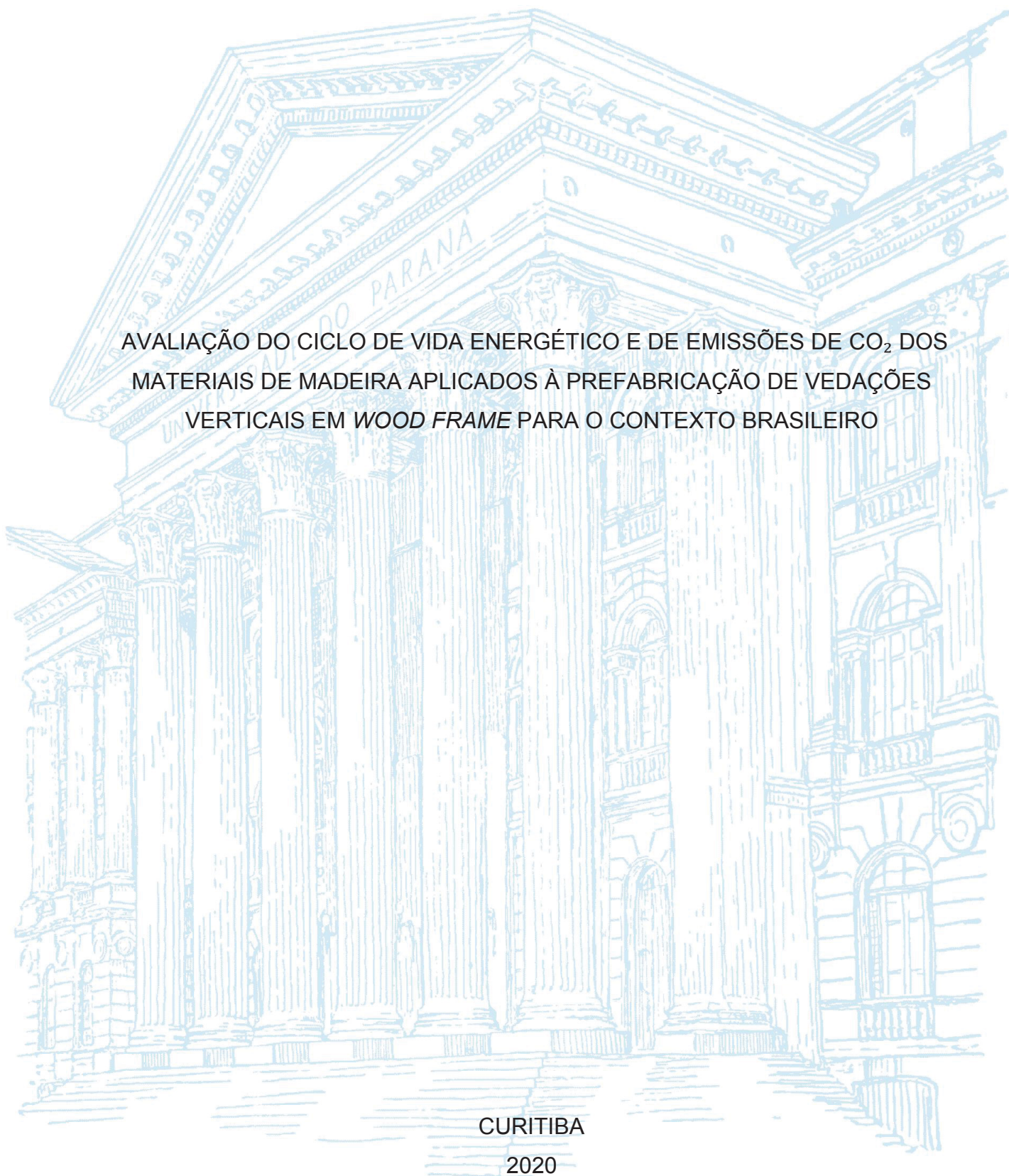
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANNA CLAUDIA FISCHER

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DOS  
MATERIAIS DE MADEIRA APLICADOS À PREFABRICAÇÃO DE VEDAÇÕES  
VERTICAIS EM *WOOD FRAME* PARA O CONTEXTO BRASILEIRO

CURITIBA

2020



ANNA CLAUDIA FISCHER

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DOS  
MATERIAIS DE MADEIRA APLICADOS À PREFABRICAÇÃO DE VEDAÇÕES  
VERTICAIS EM *WOOD FRAME* PARA O CONTEXTO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F529a

Fischer, Anna Claudia

Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de  $\text{CO}_2$  dos materiais de madeira aplicados à prefabricação de vedações verticais em Wood Frame para o contexto brasileiro [recurso eletrônico] / Anna Claudia Fischer. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2020.

Orientador: Sérgio Fernando Tavares

1. Dióxido de carbono. 2. Mercado de emissão de carbono. 3. Estruturas de madeira (Construção civil). 4. Vedação (Tecnologia). I. Universidade Federal do Paraná. II. Tavares, Sérgio Fernando. III. Título.

CDD: 546.6812

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANNA CLAUDIA FISCHER** intitulada: **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DOS MATERIAIS DE MADEIRA APLICADOS À PREFABRICAÇÃO DE VEDAÇÕES VERTICAIS EM WOOD FRAME PARA O CONTEXTO BRASILEIRO**, sob orientação do Prof. Dr. SÉRGIO FERNANDO TAVARES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 21 de Setembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

26/10/2020 11:23:03.0

SÉRGIO FERNANDO TAVARES

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/10/2020 10:00:02.0

CARLOS ROBERTO SANQUETTA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/12/2020 17:01:35.0

CRISTIANE BUENO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS)

Dedico este trabalho aos meus pais, Valdemar e Nilce;  
aos meus irmãos, Amanda e Douglas;  
e ao meu companheiro, Gabriel,  
que estiveram ao meu lado em todo o percurso do meu  
caminho até aqui.  
Dedico-o também à minha amada sogra, Solange  
(*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Sou grata:

A Deus por me conduzir por todas as etapas necessárias até aqui, pela oportunidade de cursar este mestrado na UFPR e organizar todas as condições para viver esta história em Curitiba (pessoas, lares, bolsa, oportunidades);

Aos meus pais pelo amor incondicional, orientação e educação;

Aos meus irmãos pelo amor, inspiração e estímulo;

Ao meu companheiro Gabriel, pelo amor, carinho, apoio e compreensão de sempre, mesmo de longe;

Ao Professor Sérgio por ter me escolhido e acolhido para orientação, pelos ensinamentos técnicos e “da vida”, paciência, compreensão e estímulo;

À minha prima Fabiana e sua filha Ana Julia que me receberam em sua casa nos primeiros meses de minha caminhada em Curitiba;

Às minhas queridas amigas e parceiras de pesquisa Nathália e Camila, pessoas, profissionais e pesquisadoras incríveis, com as quais tive oportunidade de trabalhar e construir várias partes deste trabalho e de outras pesquisas, além dos cafés e conversas;

Aos amigos: Teresa, Thamille, Mirella, Lisandra, Isabela, Chaiane, Maycon, Rudson, Jorge e Emílio, além dos queridos colegas e professores da Engenharia Florestal, que tornaram este percurso mais leve e feliz;

Aos professores Kátia, Dimas e Marcelo, pela inspiração, estímulo e ensinamentos técnicos;

À CAPES pelo apoio financeiro por meio de bolsa de mestrado;

Ao CNPq pelo custeio e bolsa de projeto aprovado na Chamada MCTIC/CNPq Nº 40/2018 – intitulado “Construção do Inventário do Ciclo de Vida do Sistema Construtivo *Wood Frame*”, cujos dados foram parcialmente utilizados na obtenção dos resultados deste estudo;

Às parcerias que o referido projeto possibilitou e estreitou com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF-UFPR), e com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPG-ECI - UNILA), as quais foram essenciais para a condução de parte desta pesquisa, contribuindo por meio do seu corpo docente, infraestrutura local, bem como contatos essenciais para firmar as parcerias com as empresas participantes.



## RESUMO

As atividades da indústria da Construção Civil (CC) exercem pressão sobre os recursos naturais e o uso de energia no mundo, associadas à importante contribuição para os impactos ambientais globais. A seleção dos materiais que compõem edificações é relevante em relação à sustentabilidade ambiental do ambiente construído. Estudos têm apontado a madeira como uma alternativa de desempenho ambiental favorável à aplicação na CC. Sendo *Wood Frame* (WF) um sistema construtivo cujo material característico é a madeira, entende-se que este tenha potencial para a substituição de sistemas que empregam materiais mais impactantes, além da sua adaptabilidade a sistemas construtivos industrializados, geralmente associados a processos construtivos mais limpos e edificações mais leves e flexíveis. Nesse contexto, percebe-se a oportunidade e necessidade da geração e difusão de informação da sua cadeia produtiva para a realidade brasileira. Para tanto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica normatizada para avaliar potenciais impactos e pontos de melhoria ambiental em sistemas de produto, que pode ser aplicada na análise desta cadeia do WF, além de auxiliar como uma ferramenta de gestão na tomada de decisão dentro da CC. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa foi, por meio de uma ACV simplificada, em termos dos indicadores de energia embutida (EE) e emissões de CO<sub>2</sub>, descrever qualitativa e quantitativamente o ciclo de vida dos materiais de madeira comumente aplicados no sistema construtivo WF para o contexto brasileiro - madeira serrada tratada e OSB, desde as operações florestais à aplicação destes materiais na pré-fabricação vedações verticais em WF. Os resultados desta pesquisa são apresentados por meio de 3 artigos científicos: O primeiro artigo é uma revisão sistemática de literatura para apresentar um levantamento de pesquisas envolvendo ACV aplicada ao sistema construtivo WF; o segundo artigo se refere a uma avaliação dos indicadores de energia embutida (EE) e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo produtivo de madeira serrada (MS) tratada e OSB; e o terceiro artigo, que contempla um inventário de EE e emissões de CO<sub>2</sub> do portão-ao-portão da produção industrial de vedações verticais pré-fabricadas em WF no Brasil. Os resultados apontam EE da ordem de 7,85 MJ kg<sup>-1</sup> para a produção de MS, 8,26 MJ kg<sup>-1</sup> para MS tratada; 14,32 MJ kg<sup>-1</sup> para a produção de OSB; de 13,65 MJ m<sup>-2</sup> e 13,36 MJ m<sup>-2</sup> para a montagem industrial de VVs externas e internas, respectivamente. As emissões de CO<sub>2</sub> associadas são da ordem de 0,76 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> para a produção de MS, 0,77 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> para MS tratada; 1,34 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> a produção de OSB, e de 0,52 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> e 0,50 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> para a montagem industrial de VVs externas e internas, respectivamente. Os processos produtivos dos materiais de madeira contam com contribuição predominante de recursos energéticos de fonte renovável devido à utilização de energia de biomassa proveniente da queima de resíduos lenhosos, sendo este um potencial diferencial dos processos brasileiros em relação aos processos internacionais. Finalmente, a produção de 1m<sup>2</sup> de VV externa e interna, respectivamente - incluindo os materiais de madeira nelas contidas - demanda uma EE de 209,49 MJ m<sup>-2</sup> e 200,05 MJ m<sup>-2</sup>, associada a emissão de 18,82 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> e 17,95 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, sendo aproximadamente 90% das cargas atribuídas aos processos de beneficiamento avaliados e 10% ao transportes envolvidos. O processo produtivo do OSB é o maior contribuinte para EE e emissões de CO<sub>2</sub> dentro do recorte avaliado (≈55%), seguido pela produção da madeira serrada tratada (≈35%), e pela montagem industrial da das vedações verticais em WF (≈1-2%) – parcela muito pouco significativa em comparação a demanda energética da produção dos materiais de madeira. Os resultados deste estudo contribuem para a caracterização do perfil ambiental de processos produtivos representativos da bioeconomia brasileira, fornecendo informações a respeito do WF e sua cadeia produtiva, ampliando a compreensão do setor sobre o desempenho ambiental relativo dos materiais de madeira e deste sistema construtivo não-convencional para a realidade Brasileira.

**Palavras-chave:** Energia embutida. Emissões de CO<sub>2</sub>. Madeira serrada. OSB. Vedação vertical em WF. Sistema construtivo.

## ABSTRACT

The Construction Industry (CI) activities exert pressure on natural resources and in the use of energy in the world, associated with important contribution to global environmental impacts. The selection of materials that make up buildings is relevant to the environmental sustainability of the built environment. Studies have pointed to wood as material of favorable environmental performance to application in the CI for durable purposes. As the Wood Frame (WF) system is a building system whose characteristic material is wood, it is understood that it has the potential to replace systems that apply more impacting materials, in addition to its adaptability to industrialized building systems, generally associated with cleaner constructive processes as well as lighter and flexible buildings. Thus, the opportunity and need to generate and propagate information about the production chain of this building system for the Brazilian reality are perceived. For that end, Life Cycle Assessment (LCA) - management tool to assess potential impacts and points of environmental improvement in product systems - can be applied in the analysis of the WF production chain, in addition to assisting in decision making within the CI. Thus, the goal of this research was to describe qualitatively and quantitatively the life cycle of wood-based materials applied to WF building system for the national reality, regarding embodied energy (EE) and associated CO<sub>2</sub> emissions, from forest operations up to the application of these materials in the industrial prefabrication of WF walls. The results of this study are presented by means of 3 scientific articles: The first article is a systematic literature review involving LCA applied to the WF constructive system; the second article refers to an evaluation of the indicators of embodied energy (EE) and CO<sub>2</sub> emissions associated with the production process of treated softwood timber (ST) and OSB; and the third article includes a gate-to-gate inventory of EE and CO<sub>2</sub> emissions of industrial production of prefabricated WF walls in Brazil. The results indicate EE of 7.85 MJ kg<sup>-1</sup> for the production of ST, 8.26 MJ kg<sup>-1</sup> for treated ST; 14.32 MJ kg<sup>-1</sup> for the OSB production; 13.65 MJ m<sup>-2</sup> and 13.36 MJ m<sup>-2</sup> for the industrial assembly of external and internal WF walls, respectively. The CO<sub>2</sub> emissions associated with the energy resources used in the production systems are of 0.76 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> for the production of ST, 0.77 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> for Treated ST; 1.34 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> OSB production, and 0.52 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> and 0.50 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> for the industrial assembly of external and internal WF walls, respectively. The wood materials production processes have a predominant contribution of renewable energy resources mainly due to the use of biomass energy from the burning of woody residues, which is a differential potential of Brazilian processes in relation to international processes. Finally, the production of 1m<sup>2</sup> of external and internal WF wall, respectively - including the woody materials applied to them - demands an EE of 209.16 MJ m<sup>-2</sup> and 2005.05 MJ m<sup>-2</sup>, associated with the emission of 18.82 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> and 17.95 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, being that approximately 90% of the loads are attributed to industrial processing and 10% to transport activities. The OSB production process is the greatest contributor to EE and CO<sub>2</sub> emissions within the assessed boundaries (≈55%), followed by the production of Treated Softwood Timber (≈35%), and the industrial assembly of WF walls (≈1-2%) - a not relevant share compared to the energy demand for the production of wood materials. The results of this research contribute to the characterization of the environmental profile of productive processes representative of the Brazilian bioeconomy, providing information about the WF and its production chain, expanding the sector's understanding of the relative environmental impact of wood materials and this non-conventional building system to the Brazilian reality.

**Keywords:** Embodied energy. CO<sub>2</sub> emissions. Softwood timber. OSB. Prefabricated walls. Building system.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EMISSÕES DE GEE POR SETOR ECONÔMICO. ....	23
FIGURA 2: DOMICÍLIOS, POR MATERIAL PREDOMINANTE, SEGUNDO AS GRANDES REGIÕES. ....	25
FIGURA 3: PROCESSOS ELEMENTARES DENTRO DE UM SISTEMA DE PRODUTO. ....	29
FIGURA 4: FASES ITERATIVAS DE UMA ACV. ....	30
FIGURA 5: ABORDAGEM MODULAR EUROPEIA PARA AS DIFERENTES FASES DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES. ....	35
FIGURA 6: FLUXOS DE GEE E ESTOQUES DE C DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS FLORESTAIS MADEIREIROS. ....	44
FIGURA 7: SUBSISTEMAS DE UMA EDIFICAÇÃO WF. ....	49
FIGURA 8: COMPONENTES DE ESTRUTURA DE PAREDE. ....	49
FIGURA 9: DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTO EXTERNO DO SISTEMA WF. ....	50
FIGURA 10: SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DO SUBSISTEMA PAREDE MAIS ENCONTRADAS NO BRASIL. ....	52
FIGURA 11: ETAPAS DA PESQUISA. ....	105
FIGURA 12: FASES DO CICLO DE VIDA INCLUSAS NA FRONTEIRA DE ANÁLISE DOS MATERIAIS DE MADEIRA APLICADOS ÀS VEDAÇÕES VERTICAIS. ....	108
FIGURA 13: CADEIA PRODUTIVA DOS MATERIAIS DE MADEIRA ANALISADOS E DIVISÃO POR SUBSISTEMAS. ....	109
FIGURA 14: SUBSISTEMA DO PRODUTO SS0 – OPERAÇÕES FLORESTAIS. ....	110
FIGURA 15: SUBSISTEMA SS1a - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA. ....	111
FIGURA 16: SUBSISTEMA SS1b - PRODUÇÃO DE OSB. ....	111
FIGURA 17: SUBSISTEMA SS2 - PRODUÇÃO DAS VEDAÇÕES VERTICAIS EM WF. ....	112
FIGURA 18: ENCADEAMENTO DE ARTIGOS E COMPILAÇÃO DE RESULTADOS. .....	114
FIGURA 19: EE PARA A PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA. ....	175
FIGURA 20: EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA. .....	175

FIGURA 21: EE PARA A PRODUÇÃO DE 1 m³ DE OSB.....	176
FIGURA 22: EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE 1 m³ DE OSB.....	177
FIGURA 23: EE NO PROCESSO PRODUTIVO DOS MATERIAIS. ....	178
FIGURA 24: EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DOS MATERIAIS .....	178
FIGURA 25: <b>EE</b> PARA A MONTAGEM DE 1 m² DE <b>VV EXTERNA</b> . ....	180
FIGURA 26: EMISSÕES DE <b>CO<sub>2</sub></b> PARA A MONTAGEM DE 1 m² DE <b>VV EXTERNA</b> . .....	180
FIGURA 27: EE PARA A MONTAGEM DE 1 m² DE <b>VV INTERNA</b> . ....	181
FIGURA 28: EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> PARA A MONTAGEM DE 1 m² DE <b>VV INTERNA</b> . .....	181
FIGURA 29: EE PARA A PRODUÇÃO DE 1 m² DE <b>VV EXTERNA</b> . ....	183
FIGURA 30: EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE 1 m² DE <b>VV EXTERNA</b> . .....	183
FIGURA 31: EE PARA A PRODUÇÃO DE 1 m² DE <b>VV INTERNA</b> .....	185
FIGURA 32: EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE 1 m² DE <b>VV INTERNA</b> . .....	185
FIGURA 35: BALANÇO DE CARBONO PARA <b>VV EXTERNA</b> . ....	188
FIGURA 36: BALANÇO DE CARBONO PARA <b>VV INTERNA</b> . ....	188

## LISTA DE FIGURAS – ARTIGO 1

FIGURE A 1: STEPS OF THE SYSTEM SEARCH FLOW LITERATURE REVIEW METHOD.....	62
FIGURE A 2: SYSTEMATIC REVIEW PROCESSING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE.....	65
FIGURE A 3: DEVELOPMENT OF PUBLICATIONS WITHIN THE REVIEW TIMEFRAME.....	67
FIGURE A 4: GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF STUDIES REGARDING THE NUMBER OF PUBLISHED PAPERS.....	69
FIGURE A 5: KEYWORD CLOUD ACCORDING TO INCIDENCE ON REVIEWED PAPERS <sup>1</sup> . ....	70
FIGURE A 6: DISTRIBUTION OF ARTICLES BY THEMATIC AXES. ....	71

## **LISTA DE FIGURAS – ARTIGO 2**

FIGURE B 1: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES FROM OSB PRODUCTION TO EE. ....	130
FIGURE B 2: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES IN THE PRODUCTION OF OSB TO CO <sub>2</sub> EMISSIONS. ....	130
FIGURE B 3: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES IN THE PRODUCTION OF SOFTWOOD TIMBER (UNTREATED) TO EE..	132
FIGURE B 4: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES IN THE PRODUCTION SOFTWOOD TIMBER(UNTREATED) TO CO <sub>2</sub> EMISSIONS. ....	132

## **LISTA DE FIGURAS – ARTIGO 3**

FIGURE C 1: CONSIDERED LIFE-CYCLE STAGES ACCORDING TO EN 15978 (2011).....	151
FIGURE C 2: SYSTEM BOUNDARIES AND PROCESS FLOW OF THE WOOD- FRAMED WALL LIFE-CYCLE PRODUCTION SYSTEM UNDER STUDY (GATE-TO-GATE PERSPECTIVE).....	152
FIGURE C 3: CHARACTERISTIC INTERNAL AND EXTERNAL WALL ASSEMBLIES UNDER STUDY. ....	154
FIGURE C 4: PROCESS ENERGY USE AND ASSOCIATED CO <sub>2</sub> EMISSIONS ...	164
FIGURE C 5: TRANSPORTATION AND PROCESS ASSOCIATED CO <sub>2</sub> EMISSIONS .....	165

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: SUBSISTEMAS E SUBUNIDADES DE ANÁLISE ENVOLVIDAS NO ESTUDO.....	113
QUADRO 2: EE e emissões de CO <sub>2</sub> associadas ao processo produtivo de 1 t seca de madeira serrada tratada. ....	174
QUADRO 3: EE e emissões de CO <sub>2</sub> associadas ao processo produtivo de 1 m <sup>3</sup> de OSB. ....	176
QUADRO 4: EE e emissões de CO <sub>2</sub> associadas ao processo de montagem industrial de e 1 m <sup>2</sup> de vedação vertical interna e externa. ....	180
QUADRO 5: FLUXOS DE REFERÊNCIA DOS MATERIAIS DE MADEIRA EM RELAÇÃO ÀS UNIDADES DECLARADAS PARA O PROCESSO DE MONTAGEM DE VEDAÇÕES VERTICAIS. ....	182
QUADRO 6: EE E EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE 1 m <sup>2</sup> DE <b>VV EXTERNA</b> . ....	182
QUADRO 7: EE E EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> PARA 1 m <sup>2</sup> DE <b>VV INTERNA</b> . ....	184
QUADRO 8: CO <sub>2</sub> POTENCIALMENTE IMOBILIZADO EM HWP.....	187

## LISTA DE TABELAS – ARTIGO 1

TABLE A 1: SELECTION CRITERIA FOR LITERATURE REVIEW.....	63
TABLE A 2: INCIDENCE OF PAPERS PER JOURNAL IN THE SYSTEMATIC REVIEW.....	68
TABLE A 3: NUMBER OF PUBLICATIONS BY COUNTRY.....	69
TABLE A 4: CLASSIFICATION OF THEMATIC AXES AND AUTHORS OF THE STUDIES RELATED TO THE SYSTEMATIC REVIEW. ....	71
TABLE A 5: OBSERVED RESEARCH GAPS.....	84

## LISTA DE TABELAS – ARTIGO 2

TABLE B 1: CO <sub>2</sub> EMISSIONS FOR BRAZILIAN THERMOELECTRICITY PRODUCTION .....	122
TABLE B 2: CALORIFIC VALUE AND CO <sub>2</sub> EMISSIONS BY ENERGY SOURCE..	123

TABLE B 3: FORESTRY INVENTORY DATA FOR THE PRODUCTION OF 1 m <sup>3</sup> OF OSB. ....	124
TABLE B 4: FACTORY MANUFACTURING INVENTORY FOR 1 M <sup>3</sup> OSB PRODUCTION. ....	124
TABLE B 5: EE AND CO <sub>2</sub> EMISSION ASSOCIATED TO 1 KG OF MDI RESIN PRODUCTION. ....	125
TABLE B 6: EE AND CO <sub>2</sub> EMISSION ASSOCIATED TO 1 KG OF PARAFFIN WAX PRODUCTION. ....	126
TABLE B 7: FOREST INVENTORY DATA FOR THE PRODUCTION OF 1 TON OF PINE TIMBER. ....	127
TABLE B 8: INVENTORY DATA THE MANUFACTURING OF 1 T OF PLANED AND DRIED SOFTWOOD TIMBER. ....	128
TABLE B 9: EE AND CO <sub>2</sub> EMISSIONS FOR THE PRODUCTION OF 1M <sup>3</sup> OF OSB. ....	129
TABLE B 10: EE AND CO <sub>2</sub> E EMISSIONS DE FOR THE PRODUCTION OF 1 T OF PLANNED AND DRIED SOFTWOOD TIMBER. ....	131
TABLE B 11: REFERENCE VALUES FOR OSB PRODUCTION BY OTHER AUTHORS. ....	133
TABLE B 12: REFERENCE VALUES FOR TIMBER PRODUCTION BY OTHER AUTHORS. ....	136

### **LISTA DE TABELAS – ARTIGO 3**

TABLE C 1: CO <sub>2</sub> EMISSIONS FOR BRAZILIAN THERMOELECTRICITY PRODUCTION .....	159
TABLE C 2: TRANSPORTATION DISTANCES .....	160
TABLE C 3: GLOBAL INVENTORY DATA (GATE-TO-GATE PERSPECTIVE) PER DECLARED UNIT (1 m <sup>2</sup> OF PREFABRICATED WOOD FRAME EXTERNAL WALL AT FACTORY GATE). ....	162
TABLE C 4: GLOBAL INVENTORY DATA (GATE-TO-GATE PERSPECTIVE) PER DECLARED UNIT (1 m <sup>2</sup> OF PREFABRICATED WF INTERNAL WALL AT FACTORY GATE). ....	162

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	- Alvenaria Convencional
ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
ACVE	- Avaliação do Ciclo de Vida Energético
ACVCO <sub>2</sub>	- Avaliação do Ciclo de Vida de CO <sub>2</sub>
AICV	- Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
C	- Carbono
CC	- Construção Civil
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de Carbono
DATec	- Documentação de Avaliação Técnica
DAP	- Declaração Ambiental de Produto
EE	- Energia Embutida
EPD	- <i>Environmental Product Declaration</i>
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	- Potencial de Aquecimento Global ( <i>Global Warming Potential</i> )
GEE	- Gases do Efeito Estufa
HIS	- Habitação de Interesse Social
HWP	- <i>Harvested Wood Products</i>
IBÁ	- Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	- <i>The Inventory of Carbon and Energy</i>
ICV	- Inventário do Ciclo de Vida
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
kg	- kilo
LSF	- <i>Light Steel Frame</i>
MCT	- Ministério de Ciência e Tecnologia
MDI	- <i>Methylene diphenyl diisocyanate</i>
MJ	- <i>Megajoule</i>
NREL	- <i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OSB	- <i>Oriented Strand Board</i>
PBQP-H	- Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat



PNAD	- Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios
PVC	- Policloreto de vinila
SINAT	- Sistema Nacional de Avaliação Técnica
USLCI	- <i>United States Life Cycle Inventory</i>
WF	- <i>Wood Frame</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	20
1.2 OBJETIVO.....	21
1.3 PRESSUPOSTOS.....	21
1.4 JUSTIFICATIVAS .....	22
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	27
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>29</b>
2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	29
2.1.1 Definição do objetivo e escopo.....	31
2.1.2 Inventário de Ciclo de Vida (ICV) .....	31
2.1.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) .....	32
2.1.4 Interpretação .....	32
2.2 ACV DE EDIFICAÇÕES.....	33
2.2.1 Avaliação de edificações segundo a abordagem modular europeia (EN) .....	34
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE).....	36
2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> (ACVCO <sub>2</sub> ).....	37
2.5 MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	39
2.5.1 Madeira e o ciclo do carbono .....	42
2.5.2 Edificações de madeira e o ciclo de carbono .....	45
2.6 SISTEMA CONSTRUTIVO <i>WOOD FRAME</i> .....	47
2.6.1 <i>Wood Frame</i> no Brasil.....	51
2.6.1.1 A madeira empregada .....	53
<b>3 ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>56</b>
3.1 WOOD PRODUCTS APPLIED TO THE <i>WOOD FRAME</i> CONSTRUCTION SYSTEM: A LIFE CYCLE ASSESSMENT SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW. .	56
3.1.1 INTRODUCTION.....	57
3.1.1.1 Life Cycle Assessment .....	59
3.1.1.2 Wood Frame Construction System.....	60
3.1.2 METHODS .....	62
3.1.3 RESULTS ANALYSIS .....	66
3.1.3.1 Descriptive analysis.....	66
3.1.3.2 Qualitative analysis.....	70

3.1.4 DISCUSSION .....	72
3.1.4.1 Discussion of descriptive analysis .....	72
3.1.4.2 Discussion of thematic analysis.....	75
3.1.4.3 Major scientific gaps .....	84
3.1.5 FINAL CONSIDERATIONS .....	86
3.2 REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES .....	98
<b>4 MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>102</b>
4.1 CLASSIFICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	102
4.1.1 Justificativa da escolha a partir do objetivo .....	103
4.2 PROTOCOLO DE PESQUISA .....	105
4.3 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	105
4.3.1 Unidade de análise.....	106
4.3.2 Definição do objetivo e escopo.....	106
4.3.2.1 Subsistema 0 (SS0) - Operações florestais.....	110
4.3.2.2 Subsistema 1 (SS1) - Beneficiamento dos materiais de madeira.....	111
4.3.2.3 Subsistema 2 (SS2) - Montagem industrial de vedações verticais em WF ..	112
4.3.3 Inventário do ciclo de vida – coleta e processamento de dados .....	113
<b>5 EMBODIED ENERGY AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS OF THE PRODUCTION WOOD-BASED MATERIALS APPLIED TO WOOD FRAME CONSTRUCTION: ASSESSMENT FOR THE BRAZILIAN CONTEXT.....</b>	<b>116</b>
5.1 INTRODUCTION .....	117
5.1.1 WOOD FRAME BUILDING SYSTEM IN BRAZIL.....	118
5.1.2 WOOD MATERIALS APPLIED TO THE WF IN BRAZIL.....	119
5.1.3 LIFE CYCLE ASSESMENT (LCA) .....	119
5.1.3.1 Life Cycle Energy Assessment (LCEA) .....	120
5.1.3.2 Life Cycle CO <sub>2</sub> Emissions Assessment (LCCO <sub>2</sub> A) .....	120
5.2 METHOD.....	121
5.2.1 GOAL AND SCOPE: .....	121
5.2.2 LIFE CYCLE INVENTORY .....	121
5.2.2.1 Energy resources CO <sub>2</sub> emissions.....	122
5.2.2.2 OSB production inventory.....	123
5.2.2.3 Softwood timber production inventory .....	126
5.3 RESULTS.....	129
5.3.1 OSB PRODUCTION.....	129

5.3.2 PLANNED AND DRIED SOFTWOOD TIMBER PRODUCTION .....	131
5.4 DISCUSSION .....	132
5.4.1 OSB PRODUCTION.....	132
5.4.2 SOFTWOOD TIMBER PRODUCTION.....	135
5.5 CONCLUSIONS .....	139
<b>REFERENCES.....</b>	<b>140</b>
<b>6 EMBODIED ENERGY AND CARBON EMISSION INVENTORY OF INDUSTRIAL PRODUCTION OF PREFABRICATED WOOD-FRAMED WALLS: A BRAZILIAN CASE STUDY.....</b>	<b>146</b>
6.1 INTRODUCTION.....	146
6.2 METHODS .....	149
6.2.1 Goal and scope definition .....	149
6.2.2 DECLARED UNITS AND SYSTEM BOUNDARIES .....	151
6.2.3 Description of the product under assessment .....	152
6.2.4 Description of the system under study .....	155
6.2.5 Data quality and simplifications .....	156
6.2.6 Allocation procedures.....	158
6.3 LIFE CYCLE INVENTORIES.....	158
6.3.1 Energy use and associated emissions .....	158
6.3.2 Transportation burdens .....	160
6.3.3 Prefabricated WF walls LCI.....	161
6.3.4 Process primary energy consumption and associated CO <sub>2</sub> emissions.....	163
6.3.5 Process x transportation associated CO <sub>2</sub> emissions .....	164
6.3.6 CARBON STORAGE.....	165
6.4 DISCUSSION .....	166
6.5 CONCLUSION .....	169
<b>REFERENCES.....</b>	<b>170</b>
<b>7 COMPILAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>174</b>
7.1 COMPILAÇÃO DOS DADOS GERADOS PARA A COMPISIÇÃO DE VEDAÇÕES VERTICAIS.....	181
7.1.1 Vedação vertical externa .....	182
7.1.2 Vedação vertical interna .....	184
7.1.3 Balanço de carbono .....	187
<b>8 CONCLUSÕES .....</b>	<b>190</b>

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	193
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>195</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da Construção Civil (CC) é de grande importância social, econômica e, em especial, ambiental, pois suas atividades exercem pressão sobre os recursos naturais e o uso de energia em todo o mundo, associada a uma importante contribuição para os impactos ambientais globais (UNEP, 2009; UNEP, 2016; IEA, 2013, IPCC, 2014).

Há diversas oportunidades de melhoria ambiental no ciclo de vida de edificações, sendo a escolha de materiais de construção uma delas. Energia proveniente de combustíveis fósseis é utilizada em cada fase do ciclo de vida de materiais de construção, e com ela, suas emissões associadas (HEYWOOD, 2017). A energia e as emissões “embutidas” ou “incorporadas” - associadas às edificações antes mesmo da sua fase de uso - têm se mostrado cada vez mais significativas entre os impactos totais do ambiente construído (GIESEKAM et al., 2014; MAO et al., 2013) ao passo que edificações se tornam operacionalmente mais eficientes.

Além da escolha de materiais, diferentes métodos de construção também influenciam as emissões na fase de construção. Sistemas construtivos industrializados ou parcialmente produzidos em indústrias, caracterizados por uma produção eficiente, proporcionando uma construção de qualidade e mais rápida (NHBC FOUNDATION, 2017), têm resultado em benefícios ambientais significativos nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE<sup>1</sup>) em comparação com os métodos de construção convencionais (MAO et al., 2013), além de serem associados a um menor consumo de energia e menor geração de resíduos (LOVELL; SMITH, 2010).

---

<sup>1</sup>As emissões de GEE são produzidas a partir de uma ampla variedade de atividades industriais para transformar materiais química ou fisicamente. IPCC aborda emissões diferentes de gases de efeito estufa, incluindo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) além de outros compostos fluorados e halogenados (IPCC, 2006; IPCC, 2019b). Além desses, há também os GEEs “indiretos” que não contribuem diretamente para o efeito estufa, mas uma vez que são lançados na atmosfera formam substâncias que contribuem para o efeito estufa (ex: monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis não-metano (NMVOC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)(IPCC, 2006; IPCC, 2019a). Recentemente – com a publicação do *Refinement of 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* – passou também abordar outros gases de efeito estufa halogenados não fornecidos nos relatórios anteriores, devido à intensa utilização destes na fabricação de eletrônicos (IPCC, 2019b). Usualmente, três principais GEEs - CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O - são usados para contabilizar a emissão de CO<sub>2</sub> equivalentes, ou seja, adaptado para uma base comum por meio de fatores de caracterização.



A maior parte das emissões incorporadas está associada à produção dos materiais (GIESEKAM et al., 2014). No contexto da seleção de materiais para a composição das edificações, a cadeia de materiais de madeira tem potencial de contribuição para o desenvolvimento de edificações mais sustentáveis, visto que são materiais de fonte renovável, que imobilizam carbono, e que seus processos de fabricação costumam ser menos intensivos em energia e dependentes de combustíveis fósseis, apresentando vantagens ambientais em relação aos seus produtos alternativos, como concreto, tijolos cerâmicos, alumínio e aço (BUCHANAN; LEVINE, 1999; WERNER; RICHTER, 2007 ; BERGMAN et al, 2014). Assim, à medida em que materiais de madeira são corretamente instalados e usados, eles tendem a apresentar um perfil ambiental mais favorável do que os produtos equivalentes feitos de outros materiais (WERNER; RICHTER, 2007).

Embora a madeira esteja entre os mais antigos materiais de construção, no Brasil, seu uso como material estrutural e durável na construção enfrenta barreiras, especialmente culturais (GARCIA, 2014; SOTSEK; SANTOS, 2018), pois o país adotou a alvenaria de concreto armado e tijolos cerâmicos como técnica construtiva convencional (MUNARO et al., 2018). A partir da década de 1970, a madeira começou a perder espaço para a inserção massiva das estruturas de concreto no Brasil (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). O percentual de edificações predominantemente de madeira que em 1970 era de 20,2% em relação ao total de edificações (IBGE, 1970), diminuiu drasticamente de para 4.6% em 2017 (IBGE, 2017a). Enquanto isso, em países da América do Norte, Ásia e Europa, estruturas de madeira continuaram evoluindo por meio de sistemas construtivos que empregam a madeira como material característico e têm sido amplamente adotados com qualidade e excelência (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

Apesar do cenário nacional em relação ao uso da madeira para fins duráveis em edificações, no início de 2010, o *Wood Frame* (WF) – sistema construtivo que tem por característica ser estruturado em perfis e painéis de madeira em combinação com outros materiais - começou a ser empregado na construção brasileira, e passou a ter maior aplicação no Brasil a partir de 2011, com a Diretriz SiNAT 005, que regulamenta sistemas construtivos leves de madeira.

Considerando-se as barreiras sociais e culturais da aplicação da madeira como material de construção no Brasil, e sendo ela o principal material do WF, observa-se a necessidade da geração e transmissão de informação sobre o material

e o sistema construtivo WF como um todo, visando colaborar com o seu desenvolvimento. Ainda, apesar de a associação de materiais de madeira à sistemas construtivos industrializados potencialmente apresentar um bom perfil ambiental em relação estágio de produto do ciclo de vida da edificação, é necessário que tais aspectos ambientais sejam quantificados para a realidade em que são empregados.

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica internacionalmente normatizada para avaliar potenciais impactos ambientais de materiais, produtos e serviços que pode contribuir com o suprimento da demanda por informações sobre o sistema construtivo WF, gerando conhecimento sobre o seu desempenho ambiental, além de poder atuar como uma ferramenta de gestão da sua cadeia produtiva.

Apesar de pesquisas internacionais relatarem um desempenho ambiental superior do sistema construtivo WF ao longo ciclo de vida de edificações, são poucos os estudos que o fazem para a realidade nacional, ou que desenvolvem ACV do sistema a partir de dados característicos do Brasil. Portanto, pouco se sabe sobre desempenho ambiental do sistema construtivo WF para o contexto nacional.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

As principais questões que esta dissertação busca esclarecer são: com base nos princípios da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), quais são as cargas ambientais, em termos de energia embutida (EE) e emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos processos produtivos dos materiais de madeira comumente aplicados no sistema construtivo WF no Brasil e do processo de pré-fabricação de vedações verticais WF no país?

Estas questões de pesquisa são pertinentes no que se refere a conhecer e quantificar indicadores de desempenho ambiental envolvidos no processo produtivo de produtos Brasileiros, e, portanto, estão intimamente relacionadas à execução de ACVs a partir de dados provenientes da realidade nacional.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo principal desta pesquisa é, por meio de uma ACV simplificada, em termos dos indicadores de energia embutida (EE) e emissões de CO<sub>2</sub>, descrever qualitativa e quantitativamente o ciclo de vida dos materiais de madeira comumente aplicados no sistema construtivo WF para o contexto brasileiro. A avaliação aborda as fases A1-A3 do ciclo de vida de edificações, definidas na norma europeia EN 15978 (2011), que correspondem às etapas das operações florestais à aplicação dos materiais na pré-fabricação vedações verticais em WF.

## 1.3 PRESSUPOSTOS

Por meio da revisão de literatura, foram identificados estudos nacionais e internacionais que, principalmente utilizando-se da técnica ACV, apontam desempenho ambiental superior do sistema construtivo WF em relação a outros sistemas construtivos (BUCHANAN; LEVINE, 1999; GUSTAVSSON, PINGOUD SATHRE, 2006; LIPPKE et al., 2004; RAMOS, 2019), além de estudos que apontam o perfil ambiental de materiais de madeira como vantajosos em relação aos seus produtos alternativos - como o concreto, tijolos cerâmicos, alumínio, e o aço – por consumirem menos energia para produção e como por apresentarem processos produtivos em geral menos dependentes de recursos energéticos provenientes de fontes fósseis (BERGMAN et al., 2014; BUCHANAN; LEVINE, 1999).

No entanto, no que se refere à análise do sistema construtivo propriamente dito, apesar de pesquisas conduzidas em outros países indicarem melhor desempenho ambiental de sistemas cujo material característico é a madeira - como o WF - são poucos os estudos que discorrem sobre perfil ambiental deste sistema construtivo no Brasil, e ainda que o façam, em geral são conduzidos com base em dados ou estudos que representam produtos internacionais, como os trabalhos de Monich (2012), Oliveira (2016), e Ramos (2019). Estudos desenvolvidos com esta abordagem podem não alcançar a qualidade desejada ao retratar a realidade do Brasil (GUIA QUALIDATA, 2016), já que há diferenças tecnológicas em relação ao WF e seus componentes produzidos no Brasil e em outros países, e também em relação à participação de diferentes recursos energéticos nos processos produtivos.

Com base nisso, esta pesquisa parte dos seguintes pressupostos:

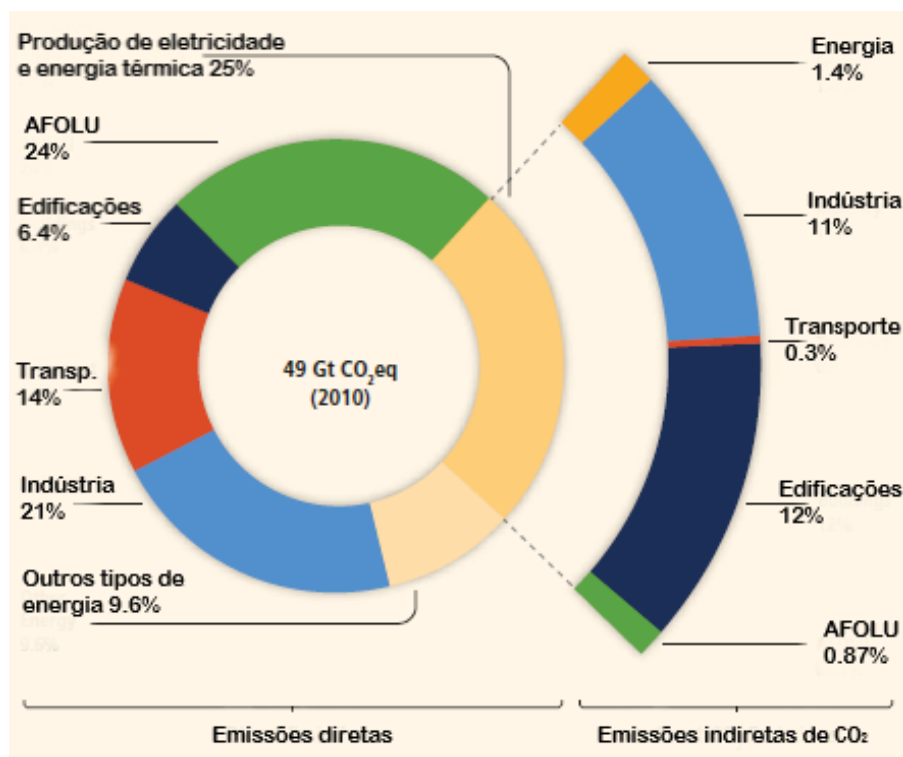
- i. Sendo os materiais lenhosos os elementos que caracterizam este sistema construtivo, a análise da cadeia dos materiais de madeira comumente empregados no sistema à aplicação destes na parede WF é um bom princípio para a geração de informação sobre o perfil ambiental do sistema construtivo no contexto nacional – como o recorte proposto na Declaração Ambiental de Produto (DAP) intitulada *Prefabricated Light WF Open Wall* (QWEB, 2019);
- ii. o desempenho ambiental dos materiais de madeira, no que tange o uso de recursos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> associadas, apresentam-se como uma alternativa mais sustentável para aplicação na CC (BERGMAN et al., 2014; PEREZ-GARCIA et al., 2005;
- iii. estudos de materiais de madeira (LIPPKE et al, 2010; BERGMAN et al., 2014) e Declarações Ambientais de Produto internacionais indicam que o carbono imobilizado nos materiais de madeira é geralmente superior às emissões geradas por seus processos produtivos, gerando uma economia e emissões, o que pode fomentar a utilização da madeira para fins duráveis.

#### 1.4 JUSTIFICATIVAS

A construção civil (CC) representa mais de um terço do consumo total da energia mundial (IEA, 2013) e como resultado, o setor é responsável por cerca de um terço das emissões globais de CO<sub>2</sub> associadas ao uso de recursos energéticos (IEA, 2013; UNEP, 2009; UNEP, 2016). O IPCC (2014) aponta os setores de fornecimento de energia (35%) agricultura, florestas e uso da terra - AFOLU - (24%), indústria (21%), transportes (14%) e edificações (3%) como os responsáveis das emissões diretas de GEE. No entanto, como pode-se observar na FIGURA 1, quando se contabilizam as emissões indiretas, ou seja, quando as emissões da produção de eletricidade e energia térmica calor são atribuídas aos setores que usam a energia final, aumentam as participações dos setores da indústria e da CC para 31% e 19% das emissões globais de GEE, sendo que nesta divisão, emissões decorrentes das atividades de construção estão inseridas no setor “indústria” (IPCC, 2014).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP - coloca a CC como detentora do maior potencial para redução de emissões GEE em comparação a outros setores emissores (UNEP, 2009). A promoção da sustentabilidade no setor pode partir de variadas ações dentro das fases do ciclo de vida das edificações, sejam elas pré-operacional, operacional e pós-operacional. Discussões anteriores demonstraram preocupação dominante com relação à eficiência energética durante a fase operacional do ciclo de vida de edificações (HAFNER; RUTER, 2018), no entanto, nota-se interesse crescente na redução da energia embutida (EE) - quantidade de energia usada na produção de materiais de construção e nas emissões associadas à produção de materiais de construção, como parte do objetivo de tornar o ciclo de vida de edificações mais sustentável (IDDON; FIRTH, 2013; BERGMAN; KAESTNER; TAYLOR, 2016; HAFNER; RUTER, 2018), reforçando que a escolha e utilização de materiais com melhor desempenho ambiental, que consumam menos energia, que utilizem menos recursos fósseis, e com potencial de flexibilização para projetar a circularidade dos recursos, é importante.

FIGURA 1: EMISSÕES DE GEE POR SETOR ECONÔMICO.



Fonte: Tradução da autora, adaptado de (IPCC, 2014).

Neste sentido, a madeira é um material de construção de fonte renovável, que apresenta vantagens ambientais em relação aos seus produtos alternativos (BERGMAN et al., 2014). Sendo um produto menos processado, no contexto da CC pode ser utilizada em substituição a materiais que requerem muita energia em seus processos produtivos, principalmente de fontes fósseis, e associados a altas emissões de GEE na atmosfera, como o concreto, tijolos cerâmicos, alumínio, e o aço (BUCHANAN; LEVINE, 1999). Além disso, CO<sub>2</sub> atmosférico é armazenado na madeira na forma de carbono por meio da fotossíntese durante o crescimento de árvores, sendo que estes dois efeitos – substituição (de outros materiais) e armazenamento (de CO<sub>2</sub> atmosférico) – tornam o uso da madeira em detrimento a outros materiais uma ‘economia de emissões de carbono’ (BERGMAN et al., 2014).

No contexto de sistemas construtivos que aplicam madeira para fins duráveis, estudos internacionais indicam que edificações cujo material característico é a madeira requerem menos energia e estão associadas a menor emissão de CO<sub>2</sub> durante o seu ciclo de vida em relação a edificações com outros tipos de estrutura (BUCHANAN; LEVINE, 1999; LIPPKE et al., 2004; GUSTAVSSON; PINGOUD; SATHRE, 2006). Ainda, sistemas construtivos atuais que aplicam madeira podem ser altamente pré-fabricados e rapidamente montados no canteiro de obra (RAMAGE et al., 2017), sendo que o fator de industrialização de sistemas construtivos tem se mostrado vantajoso em termos de emissões de GEE (MAO et al., 2013), com menor consumo de energia e menor geração de resíduos (LOVELL; SMITH, 2010) em relação a métodos de construção convencionais.

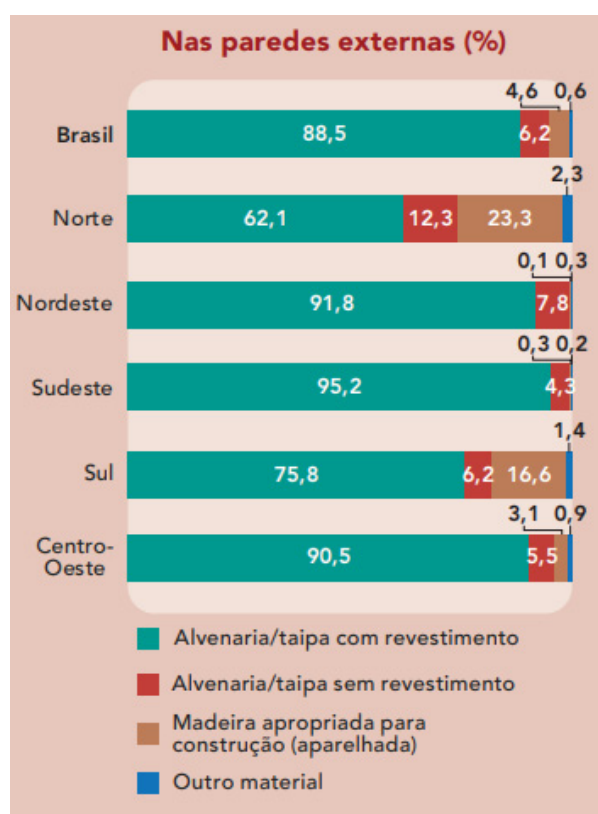
Apesar dos vários fatores favoráveis à aplicação de sistemas construtivos industrializados de madeira no Brasil, a porcentagem de edificações de madeira em relação ao total de edificações no Brasil diminuiu drasticamente de 20,2% em 1970 (IBGE, 1970) para 4,6% em 2017 (IBGE, 2017a). Isso está provavelmente relacionado ao fato de o Brasil ter adotado a alvenaria de tijolos cerâmicos como método construtivo convencional (MUNARO et al, 2019), conforme pode ser visto na FIGURA 2, que ilustra o domínio de habitações de alvenaria em todo o Brasil.

O fato é que a implementação do uso da madeira no Brasil enfrenta barreiras para sua aplicação, especialmente culturais (GARCIA, 2014; SOTSEK; SANTOS, 2018). Garcia (2014) encontrou uma forte correlação entre a diminuição das casas de madeira com o aumento do Produto Interno Bruto (PIB) do país, o que sugere que seu uso tenha relação com o poder aquisitivo da população. Ainda, a



literatura relata barreiras como a aceitação do público brasileiro em geral, principalmente relacionada a preocupações como a durabilidade, manutenção, degradação biológica e segurança da aplicação da madeira em edificações (GARCIA 2014; SOTSEK; SANTOS, 2018; MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Estes aspectos enfatizam a necessidade de se reduzir o preconceito relacionado ao uso da madeira no Brasil por meio da geração de informação sobre o material.

FIGURA 2: DOMICÍLIOS, POR MATERIAL PREDOMINANTE, SEGUNDO AS GRANDES REGIÕES.



FONTE: Adaptado de IBGE (2017b).

Somando-se a estas questões culturais atreladas a edificações, observa-se questões sociais como o déficit habitacional no Brasil - estimado em 7,77 milhões de unidades em 2017 (MARKO, 2018) - e a consequente necessidade de produção de habitações e desenvolvimento de infraestrutura. Nota-se aí uma oportunidade para que sistemas industrializados em madeira, como o WF, sejam agentes atuantes na solução deste problema social, promovendo a inclusão social e a otimização dos recursos naturais, bem como uma opção potencial para o aumento do uso da madeira em edificações.

Ainda, por ser um grande produtor de florestal, com a maior produtividade - medida em volume de madeira produzida por unidade de área ao ano, e a menor rotação do mundo - que equivale ao tempo decorrido entre o plantio e a colheita das

árvores e detentor de tecnologia para a produção de bens duráveis a partir de madeira (IBÁ e PÖYRY, 2017), o Brasil se apresenta como um ambiente favorável para o desenvolvimento sistema construtivo WF. O país se destaca tecnicamente e tecnologicamente entre os principais *players* mundiais de produção madeireira, estando entre os principais produtores de madeira serrada - 4º maior produtor mundial de madeira serrada de folhosas e coníferas, respectivamente (FAO, 2018); e de painéis de madeira 8º lugar no ranking mundial em 2016 (IBÁ e PÖYRY, 2017).

No entanto, é recente o início da aplicação do WF no Brasil, que está em processo de normatização desde 2016 (ABNT, 2018). A aplicação do sistema construtivo no Brasil é muito menor em comparação a países como Canadá, EUA, Japão e Alemanha, onde o sistema já é aplicado em larga escala (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Na América do norte, mais de 90% das novas edificações residenciais são feitas usando alguma versão deste método construtivo (AWC e AF&PA, 2001; THALLON, 2008). Nos EUA, por exemplo, mais de 95% das casas são construídas em WF (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). No Reino Unido e na Escócia, aproximadamente 20% e 80% das novas casas são estruturas de madeira respectivamente (NHBC, 2017). Na América do Sul, o Chile e a Venezuela investem no uso de estrutura de madeira para habitações populares (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010; ARAÚJO et al., 2016).

Há expectativa de que o mercado cresça mediante a publicação da norma brasileira para o sistema construtivo, contudo, Sotsek e Santos (2018) relatam que a expansão desse sistema construtivo no Brasil é fortemente dependente de incentivos governamentais, na integração da cadeia de valor da CC e da madeira no setor privado, da divulgação de informação para reduzir o preconceito em relação ao uso da madeira, e na carência de instruir os profissionais para trabalharem com construção em madeira. O cenário de inclusão de um novo sistema construtivo em nível nacional, não só impulsiona o setor de construção, mas também toda a indústria relacionada à cadeia da madeira (MUNARO et al., 2019).

Assim, diante dos fatores - ambientais, sociais, técnicos e econômicos - apresentados nesta justificativa, nota-se a necessidade e potencial contribuição da geração e disponibilização de informações sobre o sistema construtivo WF, tanto para os tomadores de decisão como para seus potenciais usuários.

No que tange a geração de informações que caracterizem o perfil ambiental de produtos, o Brasil ainda carece de dados de ACV, pois ainda não conta com uma

significativa disponibilidade de inventários em bancos de dados. Ainda nesse contexto, a indústria da CC demanda por muitos dados para conduzir avaliação do desempenho ambiental de edificações, devido aos diversos materiais empregados.

Nesta perspectiva, propõe-se, portanto, uma contribuição para a caracterização do perfil ambiental do WF por meio de uma ACV simplificada dos materiais de madeira nele aplicados, por meio de uma ACVE e ACVCO<sub>2</sub> - ferramentas para quantificar a demanda energética e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao ciclo de vida de sistemas de produto - ao passo que contribuem com indicadores de desempenho ambiental simples e relevantes para o setor da construção civil, além de serem informações compreensíveis por tomadores de decisão, profissionais do setor, ou até mesmo dos potenciais usuários do sistema.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para melhor apresentar a pesquisa desenvolvida e os resultados obtidos, esta dissertação está dividida em **oito** capítulos.

O **capítulo 1** é denominado **Introdução** e apresenta uma contextualização do tema tratado nesta dissertação, abordando os seguintes tópicos: o problema, o objetivo, os pressupostos, além das justificativas para o desenvolvimento desta pesquisa.

O **capítulo 2** é chamado de **Referencial Teórico**, e apresenta alguns conceitos que permearam o desenvolvimento dessa pesquisa, sejam eles: a ACV e suas etapas; ACVE e ACVCO<sub>2</sub>; uso da madeira como um material de construção e o sistema construtivo *Wood Frame*.

No **capítulo 3**, é apresentado o **Estado da Arte** de referência desta pesquisa, por meio do primeiro artigo dessa dissertação (ARTIGO 1), intitulado, "*Wood products applied to the Wood Frame Construction System - a Life Cycle Assessment Systematic Literature Review*". Além do referido artigo, outras referências envolvendo projetos, documentos e trabalhos de pesquisa - nacionais e internacionais - utilizadas como base para o desenvolvimento deste trabalho são apresentadas no capítulo.

O **capítulo 4** é denominado **Método de Pesquisa** e nele são apresentados a classificação da pesquisa, o protocolo de ações para o seu desenvolvimento, bem como uma breve apresentação do objetivo e escopo do estudo, as unidades de

análise envolvidas, como foi conduzida a coleta e processamento dos dados, além de indicar como foi convencionada a apresentação e análise dos resultados.

O **capítulo 5** é a apresentação do segundo artigo desta dissertação (ARTIGO 2), intitulado “Life Cycle Energy and Carbon Dioxide Emissions Assessment of the Production of Wood Materials Applied to Wood Frame Construction for the Brazilian Context” (Avaliação do ciclo de vida energético e das emissões de CO<sub>2</sub> associados à produção de materiais de madeira aplicados no sistema construtivo Wood Frame para o contexto Brasileiro). Nele é desenvolvida a primeira etapa de geração de dados desta dissertação - a avaliação dos indicadores de EE e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo produtivo da madeira serrada e do OSB, por meio de literatura técnica a partir de estudos de processos brasileiros. São apresentados o método de desenvolvimento do artigo, resultados obtidos e discussão.

O **capítulo 6** é a apresentação do terceiro artigo desta dissertação (ARTIGO 3), intitulado “Embodied Energy and CO<sub>2</sub> Emissions Inventory of Industrial Production of Prefabricated Wood-Framed Walls: A Brazilian case study” (Inventário de energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> da produção industrial de paredes pré-fabricadas em Wood Frame: um estudo de caso brasileiro”). Nele é desenvolvida uma análise da produção industrial de paredes pré-fabricadas em WF no Brasil a partir de dados primários, a fim de apresentar um inventário de EE e emissão de CO<sub>2</sub> do processo produtivo em questão. São apresentados o método de desenvolvimento do artigo, resultados obtidos e discussão.

O **capítulo 7** é denominado **Compilação e Discussão de Resultados**. Nele são brevemente reapresentados os resultados obtidos nos artigos 2 e 3 de forma sistematizada. Em seguida é desenvolvida uma compilação dos resultados de todos os processos avaliados - produção de madeira serrada tratada; produção de OSB; e montagem industrial de vedações verticais internas e externas em WF – para a composição das vedações verticais em WF. Os resultados apresentados são também discutidos neste capítulo.

O **capítulo 8** é chamado de Conclusões, e finaliza o trabalho apontando as principais conclusões e *insights* obtidos nesta pesquisa. Também são feitas sugestões para estudos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

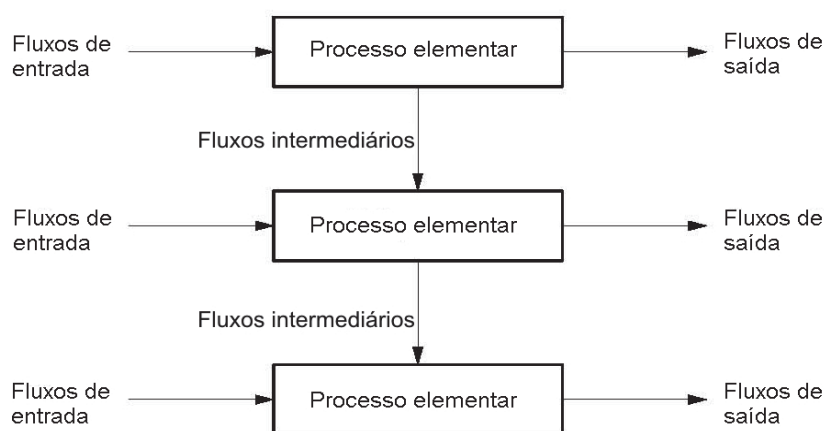
Este capítulo encontra-se dividido nos seguintes tópicos: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE); Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>); madeira como um material de construção; sistema construtivo WF.

### 2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A ACV é uma técnica internacionalmente normatizada para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um sistema de produto a partir do inventário dos fluxos de entrada e saída de matéria e energia em seu ciclo de vida (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Tais fluxos podem ser quantificados dentro de todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas (berço ou *cradle*), até sua eventual disposição final (túmulo ou *grave*), com base em objetivo e escopo pré-estabelecidos (ABNT, 2009a).

A ACV pode ser interpretada como uma ferramenta que aplica o pensamento do ciclo de vida de maneira quantitativa na análise ambiental de processos ou sistemas de produto (FU et al., 2014). **Sistemas de produto** são compostos por **processos elementares** ligados uns aos outros (ABNT, 2009a), como indica a FIGURA 3. Esta divisão facilita a identificação das entradas e saídas do sistema de produto.

FIGURA 3: PROCESSOS ELEMENTARES DENTRO DE UM SISTEMA DE PRODUTO.



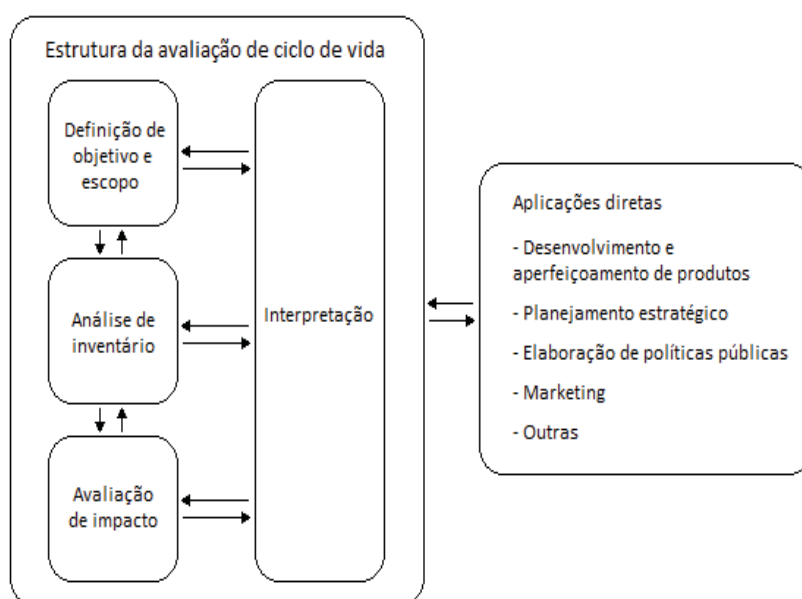
FONTE: (ABNT, 2009a).

Algumas definições relacionadas a sistemas de produto são importantes para o entendimento da lógica de execução de uma ACV. Seguem algumas delas de

acordo com ABNT (2009a): um **processo** é um conjunto de atividades que transformam entradas em saídas; um **processo elementar** é o menor elemento considerado em um processo, para o qual dados de entrada e saída são quantificados; uma **entrada** é um fluxo de produto, material ou energia que entra em um processo elementar, e uma **saída** é um fluxo de produto, material ou energia que deixa um processo elementar.

De acordo com sua estrutura metodológica, a ACV envolve quatro fases, indicadas na FIGURA 4: definição do objetivo e do escopo, Inventário do Ciclo de Vida (ICV); Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV); Interpretação dos Resultados (ABNT, 2009a; ABNT 2009b). A definição do objetivo e do escopo define os propósitos, público-alvo, fronteiras do sistema e unidade funcional. O ICV envolve a coleta de dados e cálculos para quantificar a entrada e a saída de material e energia de um sistema de produto, enquanto AICV avalia a significância dos possíveis impactos ambientais com base no ICV. Por fim, a interpretação avalia os achados para chegar a conclusões e fazer recomendações sobre o sistema de produto ou processo produtivo, de acordo com a finalidade e escopo do estudo, definidos na primeira fase (GONG et al., 2012). A ACV se caracteriza como uma técnica iterativa. Suas fases individuais utilizam os resultados das outras fases, e à medida que é executada, aspectos do escopo podem exigir modificações para atender ao objetivo original do estudo (ABNT, 2009a).

FIGURA 4: FASES ITERATIVAS DE UMA ACV.



FONTE: Adaptado de ABNT ISO 14040 (ABNT, 2009a).



### 2.1.1 Definição do objetivo e escopo

Na primeira fase da execução de uma ACV, deve ser definido e declarado o objetivo do estudo desejado, que inclui: aplicação pretendida; as razões para a execução do estudo; o público a quem se pretende comunicar os resultados; e se pretende-se utilizar os resultados a título de comparações (ABNT, 2009a).

Definido o objetivo do estudo, deve-se definir o escopo da análise, incluindo os seguintes itens, sistema de produto a ser estudado e suas funções; unidade funcional (UF); fronteiras do sistema; requisitos quanto à qualidade de dados; procedimentos de alocação, critérios de corte; categorias de impacto selecionadas e metodologia de avaliação de impactos; pressupostos e limitações do estudo; tipo de análise crítica que será conduzida (quando aplicável) (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

### 2.1.2 Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A execução do ICV envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (ABNT, 2009a). Esta é considerada a etapa mais trabalhosa de uma ACV.

Dados qualitativos e quantitativos são coletados para cada processo elementar do sistema estudado. Os dados coletados nesta fase são utilizados para quantificar as entradas e saídas dos processos elementares, e podem ser medidos, calculados ou estimados (ABNT, 2009b). Os principais tipos de dados envolvidos nas coletas são: entradas de energia, matéria-prima, entradas auxiliares e outras entradas físicas; saídas de produtos, co-produtos, resíduos, liberações para a atmosfera, água e solo, entre outros aspectos ambientais (ABNT, 2009a).

Após a coleta de dados, procedimentos de cálculo são conduzidos para gerar os resultados do inventário em relação à unidade funcional estabelecida (ABNT, 2009a). Dentre os procedimentos de cálculo estão a validação dos dados coletados – por meio de balanço de massa, balanços de energia e análises comparativas de fatores de emissão (ABNT, 2009b). Como todas as outras, o ICV é uma fase iterativa da ACV que deve estar em sintonia com o objetivo e escopo da análise, os quais podem ser revistos no processo.

### 2.1.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de AICV tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, associando dados do ICV com categorias de impacto específicas e seus respectivos indicadores. A fase de AICV envolve a seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização; correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação); cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização) (ABNT, 2009b).

A AICV enfoca impactos ambientais potenciais e não é uma avaliação absoluta ou precisa de todas as questões ambientais envolvidas em um sistema de produto, já que expressa os resultados a uma unidade de referência delimitada em um espaço e tempo, retorna apenas as questões ambientais definidas no objetivo e escopo da análise, os resultados se referem a impactos futuros e que podem ter influência das incertezas do estudo conduzido (ABNT, 2009a).

### 2.1.4 Interpretação

A interpretação do ciclo de vida é a fase final da ACV, em que os resultados de um ICV e/ou de uma AICV são sintetizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo (ABNT, 2009a). As constatações dessa interpretação podem tomar a forma de conclusões e sugestões de melhoria de processos aos tomadores de decisão.

A fase de interpretação, como todas as outras fases de uma ACV, pode envolver o processo iterativo de analisar criticamente e revisar o escopo da análise, assim como a natureza e qualidade dos dados coletados, de forma consistente com o objetivo definido. Além disso, é feita a verificação de sensibilidade, completeza e consistência da análise para então chegar às conclusões e emitir recomendações são parte da fase de interpretação da ACV (ABNT, 2009a).

## 2.2 ACV DE EDIFICAÇÕES

A ACV pode ser um instrumento importante para a aplicação do pensamento do ciclo de vida no setor da construção, fornecendo informações valiosas sobre o fluxo de materiais e energia no setor (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2012), podendo ser útil para identificar os principais contribuintes a impactos ambientais de uma edificação, e com isso as oportunidades de redução de impacto, seja na composição da edificação, ou em alguma fase específica do seu ciclo de vida (O'CONNOR; BOWICK, 2014) (ex: fase pré-operacional, fase operacional ou fase pós-operacional).

Nas últimas décadas, discussões sobre contribuição potencial do setor de construção para a mitigação da mudança climática concentraram-se no aspecto da eficiência energética durante a fase de uso operacional da edificação (O'CONNOR; BOWICK, 2016; HAFNER; RUTER, 2018). Como exemplo disso estão as políticas de redução de emissões de GEE relacionadas aos edifícios, focadas na operação das edificações: redução do consumo energético e redução da dependência de combustíveis fósseis (O'CONNOR; BOWICK, 2016).

Contudo, à medida que os edifícios se tornam mais eficientes energeticamente e menos dependentes dos combustíveis fósseis, a contribuição de emissões de GEE oriundas da fase pré-operacional do edifício tende a se tornar maior do que a contribuição da fase operacional, e consequentemente os materiais empregados na fase de construção passam a contribuir com uma parcela mais representativa dos impactos totais (O'CONNOR; BOWICK, 2016). Neste contexto, o impacto do consumo de energia primária na fabricação de produtos e a redução das emissões de GEE ao longo de todo o ciclo de vida das edificações têm ganhado importância (HAFNER; RUTER, 2018; GIESEKAM et al., 2014, MAO et al., 2013), e há também um interesse crescente em diminuir a energia embutida das edificações com o objetivo geral de diminuir os impactos ambientais associados ao setor da construção (BERGMAN; KAESTNER; TAYLOR, 2016).

Nesta perspectiva, arquitetos e engenheiros têm a oportunidade de controlar as emissões iniciais incorporadas aos seus projetos por meio de seleção e especificação de materiais, sendo esta fase de tomada de decisões uma oportunidade para a ACV de dar subsídios para que estes profissionais validem suas decisões quanto ao desempenho ambiental de seus projetos (O'CONNOR;

BOWICK, 2016). Vale ressaltar que para que isso ocorra, a disponibilização de informações sobre o perfil ambiental dos materiais é necessária.

### 2.2.1 Avaliação de edificações segundo a abordagem modular europeia (EN)

No contexto da execução de ACVs no setor da construção, o comitê de normas europeias - CEN/TC 350 – *Sustainability of construction works* – é responsável pelo desenvolvimento de métodos padronizados, baseados na Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) e outras informações ambientais quantificadas para a avaliação de aspectos de sustentabilidade de edificações, bem como de diretrizes para o desenvolvimento de declarações ambientais de produtos da construção (CEN, 2019).

Neste grupo de normas, a EN 15804:2014 - *Sustainability of construction works, Environmental product declarations, Core rules for the product category of construction products* - fornece diretrizes para avaliações a nível de produtos e serviços de construção (EN 15804, 2014); e a norma EN 15978: 2011 - *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method* – fornece diretrizes de cálculo para a avaliação do desempenho ambiental de edificações novas, existente a projetos de reforma (EN 15978, 2011).

A série de normas CEN/ TC 350 propõe uma abordagem modular para organizar a definição das fronteiras para a ACV de edificações (CEN, 2019), apresentada na FIGURA 5. De acordo com esta abordagem, as fases do ciclo de vida são representadas pelos módulos A-C, e um módulo facultativo D, considerado separadamente como informação suplementar além do ciclo de vida da edificação (GERVASIO; DIMOVA, 2018; HAFNER; RUTER, 2018), sendo que os potenciais impactos ambientais que ocorrem ao longo do ciclo de vida do edifício são atribuídos ao estágio em que ocorrem, conferindo transparência aos resultados de análises (GERVASIO; DIMOVA, 2018).

FIGURA 5: ABORDAGEM MODULAR EUROPEIA PARA AS DIFERENTES FASES DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES.



FONTE: Tradução da autora, a partir de EN 15978 (2011) e EN 15804 (2014).

A “fase de produto” - módulos A1-A3 – inclui a extração e processamento de matéria-prima (A1), transporte até o portão da fábrica e transporte interno (A2) e produção dos materiais (A3). A “fase de construção” - módulos A4-A5 – inclui o transporte de produtos do portão da fábrica ao canteiro de obras (A4), instalação do produto na construção, além da geração, processamento e disposição final de resíduos (A5). A “fase de uso” - módulos B1 a B7 - abrange o uso da edificação (B1), manutenção (B2), reparos (B3), substituição de materiais (B4), reformas (B5), bem como os transportes envolvidos nestas atividades, além dos módulos relacionados ao uso operacional de energia (B6), e uso operacional de água (B7) ao longo da vida-útil da edificação. A “fase de fim de vida” - módulos C1 a C4 - inclui os módulos de informação opcionais de desmontagem ou demolição dos produtos/ edificação (C1), transporte do produto descartado para local de reciclagem ao disposição final (C2), o processamento de resíduos para fins de reuso, reciclagem ou recuperação de energia (C3), disposição final de resíduos (C4). O módulo D representa benefícios e impactos além da fronteira do sistema, como aqueles associados à reciclagem, recuperação ou reuso de materiais (EN 15804, 2014; HAFNER; RUTER, 2018).

Dentro da abordagem modular Europeia, apenas os módulos A1 a A3 são obrigatórios para o desenvolvimento de ACV de uma edificação, representando uma análise do “berço-ao-portão” (*cradle-to-gate*) (EN 15804, 2014).

Apesar das definições e fundamentos com relação à técnica de ACV apresentados, deve-se ressaltar que as avaliações não são feitas de forma única, já que “não existe um método único para se conduzir uma ACV” (ABNT, 2009a).

Assim, sendo uma técnica de avaliação complexa, métodos simplificados de ACV surgem como forma de avaliar o *hostpots* de um sistema de produto. A Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e a ACVCO<sub>2</sub> são métodos simplificados de ACV, e são descritos a seguir.

## 2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE)

Sendo o fluxo energético em sistemas/processos um importante fluxo elementar de entrada avaliado em uma ACV, a Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) surge como um método simplificado de condução de ACV, que prioriza o inventário de dados de consumo de recursos energéticos, diretos e indiretos, ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo, dando condições para avaliação de impactos ambientais importantes como as emissões GEE associadas às fontes energéticas empregadas (TAVARES, 2006).

Em uma ACVE, considerando uma abordagem do berço-ao-túmulo dos recursos energéticos envolvidos em um sistema, a **Energia Total** do seu ciclo de vida energético é avaliada, e por ter uma estrutura mais simples do que uma ACV completa, a ACVE demanda menos custos e tempo na sua execução (TAVARES, 2006).

No contexto da CC, a ACVE se mostra como um método de avaliação interessante, já que o ciclo de vida de edificações envolve uma complexa cadeia de produtos e processos. Analogamente à abordagem modular europeia de avaliação de edificações, a ACVE de edificações envolve conceitos que relacionam o consumo de recursos energéticos e a fase do ciclo de vida em que são empregados, sejam eles: **Energia Embutida (EE)**, **Energia Operacional**; **Energia Embutida na Manutenção**; **Energia de Desconstrução**.

A **Energia Embutida (EE)**, também referida como **energia incorporada**, é definida como o total de insumos energéticos, diretos e indiretos, necessários para a fabricação e distribuição de um produto em todas as etapas pré-operacionais de seu ciclo de vida (TRELOAR, 2001), ou seja, quantidade de energia consumida para extrair, refinar, processar, transportar e fabricar um material ou produto (TAVARES, 2006; GLOVER et al., 2002; CHAU; LEUNG; NG, 2015; ATMACA; ATMACA, 2015; CIRCULAR ECOLOGY, 2019).

A energia embutida pode ser dividida em dois componentes principais: EE inicial: energia embutida na construção inicial de um edifício, que abrange Energia Embutida nos Materiais, Energia Embutida na Obra, e a Energia Embutida nos Transportes; e a EE recorrente: energia necessária para fabricar e substituir materiais de construção ao longo da vida útil do edifício (TAVARES, 2006; CHAU; LEUNG; NG, 2015; ATMACA; ATMACA, 2015).

Além da energia embutida na fase pré-operacional da edificação e seus desdobramentos descritos nos tópicos acima, há a energia utilizada nas fases subsequentes do ciclo de vida da edificação, são elas: a **Energia Operacional**, referente ao suprimento da demanda energética das atividades desenvolvidas na edificação (cocção, iluminação, entretenimento, climatização, dentre outros); **Energia Embutida na Manutenção**, referente aos insumos energéticos necessários transporte, aplicação e execução de materiais serviços em manutenções ou reformas; **Energia de Desconstrução**, referente insumos energéticos necessários nas atividades de demolição/ desconstrução da edificação, destinação final dos materiais para o reuso, reciclagem ou aterros (TAVARES, 2006), no entanto, estas não são o enfoque desta pesquisa.

## 2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>)

As emissões GEE associadas ao uso dos recursos energéticos, principalmente os fósseis, são outra forma simplificada de conduzir ACV de produtos. A Avaliação do Ciclo de Vida das Emissões de CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>) é um exemplo de método de ACV simplificado utilizado para avaliar as emissões de carbono equivalente de saída durante todo o ciclo de vida de edificações (ATMACA; ATMACA, 2015). Além das emissões de carbono decorrentes da produção dos materiais, a ACVCO<sub>2</sub> envolve também a quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas das reações químicas nos processos industriais (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

A produção de energia a partir de fontes de combustão resulta em emissões de CO<sub>2</sub>. Para os combustíveis fósseis, as emissões de CO<sub>2</sub> são comumente classificadas como “CO<sub>2</sub> fóssil”. Essa classificação é diferente do “CO<sub>2</sub> biogênico”, que é emitido a partir da queima de biomassa, como a madeira. Em termos da contribuição do CO<sub>2</sub> para o aquecimento global, não há diferença entre CO<sub>2</sub>



biogênico e o CO<sub>2</sub> fóssil. No entanto, uma distinção é comumente feita entre fontes de energia biogênica e fóssil em ACVs devido ao fato de o CO<sub>2</sub> biogênico ser cíclico em comparação com o fluxo unidirecional de CO<sub>2</sub> fóssil para a atmosfera (Bergman et al., 2014).

Em relação ao carbono fóssil, a quantidade de emissões é influenciada tanto pela quantidade de energia primária necessária para a fabricação de um determinado tipo de material, quanto pela qualidade da fonte energética utilizada (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Chau; Leung; Ng (2015) discorrem sobre dois métodos a partir dos quais a quantidade de emissões de carbono fóssil em relação à produção de um material pode ser estimada, são eles:

- 1) **Conversão de dados de consumo de energia:** emissões de carbono fóssil são estimadas por meio da multiplicação da energia utilizada por fatores de emissão dos recursos energéticos utilizados (CHAU; LEUNG; NG, 2015). Os fatores médios de emissão dos recursos energéticos variam dependendo da fonte energética (ex: fontes renováveis ou não-renováveis), e para cada país ou região, dependendo de certas características (como matriz energética, tecnologia de fabricação, origem dos materiais);
- 2) **Estimativa a partir de bancos de dados de emissões de carbono:** emissões de carbono fóssil são diretamente estimadas pela multiplicação das quantidades de materiais utilizados por fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos materiais (geralmente retirados de um banco de dados) (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Assim como a EE está relacionada à etapa pré-operacional do ciclo de vida de um produto (TRELOAR et al., 2001), o carbono embutido se refere à quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>equivalente necessárias ao processamento de um produto (CIRCULAR ECOLOGY, 2019). No contexto de edificações, as emissões de CO<sub>2</sub> embutidas são definidas como as emissões de GEE associadas aos processos de extrair e transportar matéria-prima, fabricar e entregar produtos e, em alguns casos, inclui aquelas associadas à construção (ATMACA; ATMACA, 2015; CIRCULAR ECOLOGY, 2019).

Ressalta-se, ainda, que dentro do contexto das emissões antropogênicas de GEE, CO<sub>2</sub> é considerado o principal GEE antrópico, ao passo que responde por cerca de 75% das emissões antropogênicas de GEE (IPCC, 2014). Em 2010, 76%



do total de das emissões antrópicas de GEE corresponderam ao dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, 16% ao metano (CH<sub>4</sub>), 6,2% de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) a 2,0% de gases fluorados (IPCC, 2014). Ainda, em relação às análises de inventários de GEE, para categoria de produtos de madeira – *Harvested Wood Products* (HWP) – IPCC sugere que as emissões de CO<sub>2</sub> sejam avaliadas separadamente, ou seja, de forma desagregada, por ser um inventário particularmente significativo na categoria de produto (IPCC, 2006; IPCC, 2019b).

Assim como a EE tem ganhado importância à medida que as edificações se tornam mais eficientes em sua fase operacional, o mesmo acontece com as emissões associadas ao consumo dos recursos energéticos. A importância do carbono embutido aumentará à medida que as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da fase operacional forem reduzidas, da mesma forma que a proporção de contribuição do carbono embutido aumentará em relação ao total de emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida total de edificações (IDDON; FIRTH, 2013).

A partir das noções sobre ACVE a ACVCO<sub>2</sub> apresentadas, nota-se que são ferramentas para quantificar a demanda energética e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao ciclo de vida de sistemas de produto, e que podem ser utilizadas na avaliação ambiental de edificações de forma mais simplificada.

## 2.5 MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Um dos produtos florestais de maior valor agregado é a madeira aplicada como um material estrutural na construção. Além da aplicação estrutural primária da madeira na construção, há muitos outros usos secundários ou terciários para resíduos lenhosos de construção que retêm e aumentam seu valor (RAMAGE et al., 2017).

Propriedades estruturais, térmicas, acústicas e ambientais de materiais de madeira a colocam como uma favorável opção para aplicação na construção. Suas propriedades termoacústicas estão relacionadas à baixos valores de condutividade térmica, além da aplicação de elementos de madeira para minimizar a transmissão de som (ASDRUBALI et al., 2017). Suas propriedades estruturais refletem uma ótima relação resistência-peso, além de ser um material de construção leve e flexível, permitindo fácil montagem e minimizando a necessidade de infraestruturas complexas em canteiro de obras (ASDRUBALI et al., 2017). Dentre as desvantagens

da aplicação estrutural da madeira estão o seu comportamento anisotrópico e a heterogeneidade do material, ocasionada eventualmente pela presença de nós que reduzem a resistência do material (ASDRUBALI et al., 2017).

Como material natural, a madeira é suscetível à biodegradação, especialmente sob condições de alta umidade (RAMAGE et al., 2017). A exposição direta da madeira aos fatores ambientais sem um tratamento adequado, permite o ataque de organismos xilófagos, o que pode comprometer a segurança das construções de madeira. Não é desejável que a madeira se degrade durante a vida-útil de edificações, contudo, a durabilidade dos produtos de madeira pode ser melhorada por tratamentos físico-químicos anteriormente à sua aplicação no setor de construção (RAMAGE et al., 2017).

Os tratamentos da madeira normalmente usam uma de três estratégias: modificação térmica/ química, impregnação e revestimento (RAMAGE et al., 2017). Secagem da madeira é um procedimento básico de tratamento. Detalhes construtivos que limitam a exposição da madeira à umidade e luz solar direta proporcionam mais longevidade aos componentes de madeira (ASDRUBALI et al., 2017). O uso de madeiras naturalmente mais duráveis também pode ser uma alternativa a tratamentos químicos - que podem limitar as opções de reciclagem e reutilização (RAMAGE et al., 2017).

Sendo um material combustível, preocupações com a madeira em relação ao fogo sempre estão em pauta no contexto de sua aplicação na CC. Em situação de incêndio, a madeira reage fundamentalmente diferente do aço e do concreto armado (ASDRUBALI et al., 2017), no entanto, apresenta um excelente comportamento pois, quando elementos de madeira são expostos ao fogo, carbonizam primeiramente seu perímetro externo, ficando o interior da madeira praticamente intacto (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Assim, estruturas de madeira são geralmente dimensionadas de modo a garantir integridade estrutural para um tempo suficiente para a evacuação da edificação ou extinção do fogo (RAMAGE et al., 2017). Para estrutura de madeira massiva (grandes seções), isso é feito de modo a garantir uma camada de carbonização da madeira, e para estruturas de seções menores, por meio de revestimento com materiais não combustíveis, como o gesso (RAMAGE et al., 2017).

Além de preocupações relacionadas à quantidade e fonte de recursos energéticos empregados na produção de materiais de construção, fatores como a

depleção de recursos também estão envolvidos na escolha de materiais. A cadeia de suprimento de materiais de construção comuns como o aço, concreto, tijolo, cimento, areia e agregados envolve a exploração mecânica de rochas, minérios ou solos. Alternativamente, o fornecimento de madeira é suprido exclusivamente por florestas que, pelo contrário, exigem que povoamentos florestais sejam cultivados antes que qualquer madeira possa ser colhida (RAMAGE et al., 2017). Neste sentido, mesmo as mais longas rotações florestais representam um intervalo de tempo muito curto na escala geológica, a escala de tempo para a reposição dos recursos da Terra exigidos na cadeia de outros materiais de construção (RAMAGE et al., 2017).

Além das propriedades físicas e fatores ambientais que favorecem a aplicação da madeira como um material de construção, fatores econômicos e de ordem prática também estão envolvidos. A madeira é um material adequado para a industrialização de elementos, de modo a facilitar o seu transporte e montagem (MOLINA; CALIL JUNIOR; 2010; ARAÚJO et al., 2016). Além disso, as possibilidades arquitetônicas da construção em madeira são ilimitadas, sendo o material adaptável a estilos arquitetônicos (AWC e AF&PA, 2001). Assim, o uso da madeira pode trazer benefícios econômicos para o setor da construção, já que sistemas construtivos atuais que aplicam madeira podem ser altamente pré-fabricados e rapidamente montados no canteiro de obra (RAMAGE et al., 2017).

A aplicação de elementos pré-fabricados em madeira também possibilita a modularização de edificações. Edifícios modulares podem potencialmente ser desmontados e reutilizados, mantendo, assim, efetivamente, o valor de seus ativos (LAWSON; OGDEN; BERGIN, 2011). Neste sentido, a flexibilidade da estrutura de madeira, bem como sua possibilidade de reutilização e reciclagem, corroboram com o conceito de construção circular, baseado na economia circular (CE), em que os edifícios são explorados como bancos de materiais, mudando a maneira como os fluxos de materiais são gerenciados (MUNARO et al., 2019).

Além da aplicação milenar como madeira maciça serrada, a madeira é também empregada em materiais construção estruturalmente otimizados, conhecidos como Materiais Engenheirados de Madeira (RAMAGE et al., 2017), que geralmente apresentam características mais lineares, são mais estáveis dimensionalmente e mais resistentes em comparação à madeira sólida serrada (RAMAGE et al., 2017; THALLON, 2008), como o *cross laminated timber* (CLT),

*laminated veneer lumber* (LVL), *glue laminated timber* (MLC), *I-joist* (vigas I), entre outros.

Sólidos serrados de madeira possuem um baixo nível de energia embutida. Por outro lado, produtos que exigem maior processamento (ex: compensado, OSB, materiais engenheirados) exigem mais energia para produção, mas ainda assim requerem significativamente menos energia do que suas contrapartes não-madeireiras (FPL, 2010).

### 2.5.1 Madeira e o ciclo do carbono

As florestas desempenham um papel importante no ciclo de carbono da Terra (FPL, 2010). À medida que crescem, as árvores absorvem<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> da atmosfera e o armazenam<sup>3</sup> temporariamente como carbono (C) na biomassa por meio da fotossíntese – processo que converte dióxido de carbono e água em açúcares para o crescimento das árvores e libera oxigênio para a atmosfera (HAFNER; RUETER, 2018; FPL, 2010; GUSTAVSSON; SATHRE, 2004).

O CO<sub>2</sub> absorvido da atmosfera durante a fotossíntese é convertido em madeira, casca e outros compartimentos da árvore. Em média a madeira contém cerca de 50% de C fixado por unidade de massa seca (Bergman et al., 2014). O IPCC (2006a, pág 48) aponta um valor de 47% como *default* para o teor de carbono da biomassa acima do solo, e também indica parâmetros diferenciados em função da região, gênero, compartimento ou maturidade da árvore. Especificamente em relação à aplicação da madeira em *Harvested Wood Products* (HWP), o IPCC (2019c) também sugere fatores de conversão padrão para diferentes classes de materiais de madeira. Contudo, a quantidade de C trocada pelas florestas varia, dependendo das espécies (RAMAGE et al., 2017; LAMLOM; SAVIDGE, 2003; SILVA et al. 2014), o que pode tornar a avaliação de ciclos carbono para sistemas complexos - como as florestas - desafiadora (RAMAGE et al., de 2017).

---

<sup>2</sup> Captação (ou absorção) de C ocorre durante o processamento do CO<sub>2</sub> durante a fotossíntese, principalmente no extrato superior da floresta, e em menor extensão pela absorção de minerais do solo pelas raízes (RAMAGE et al., 2017).

<sup>3</sup> Armazenamento (ou sequestro) de C por uma floresta pode ocorrer por meio do acúmulo de biomassa dentro das árvores e potencialmente dentro do solo (RAMAGE et al., 2017).

Se a madeira é “armazenada” (ou imobilizada) em um produto, pode-se dizer que o C é estocado como um sólido (Bergman et al., 2014). Assim, materiais renováveis atuam como um armazenamento temporário de C durante sua vida útil – como é o caso da madeira aplicada em edificações (HAFNER; RUETER, 2018). Este armazenamento temporário de C em produtos de madeira reduz temporariamente os níveis atmosféricos de CO<sub>2</sub>. Contudo, para que esta interpretação seja pertinente, é necessário que a madeira empregada seja proveniente de práticas florestais sustentáveis.

Segundo Lippke et al. (2011), o manejo de florestas é considerado sustentável se as colheitas forem planejadas de forma que não seja retirada madeira em maior quantidade do que é cultivada. Dessa forma, assumindo-se a retirada da madeira de fontes de manejo sustentável, o C armazenado em um produto de madeira também está sendo substituído por um novo crescimento de árvores (Bergman et al., 2014). Se práticas sustentáveis de manejo florestal forem seguidas, recursos madeireiros estarão disponíveis indefinidamente (FPL, 2010).

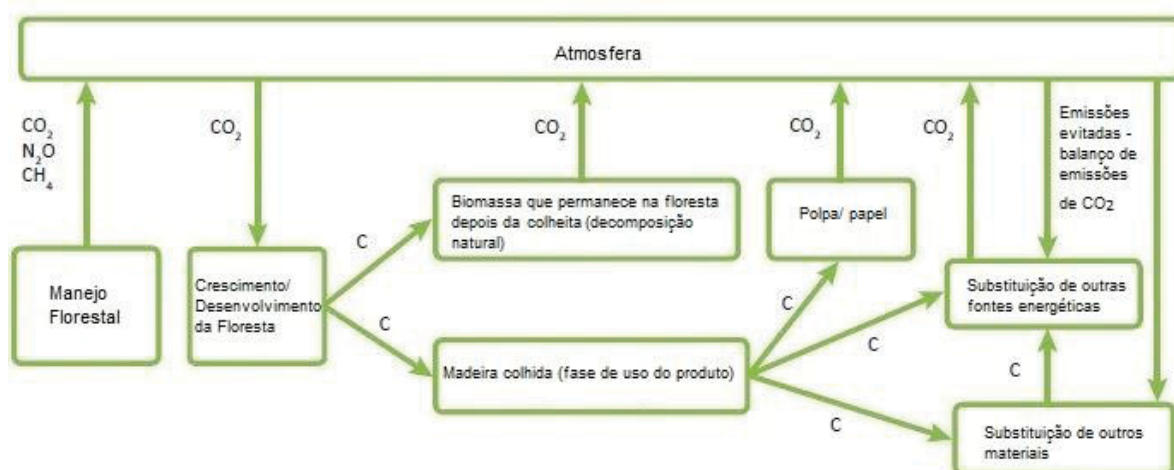
Quando uma árvore é colhida, C da biomassa viva é transferido para outros estoques de C, como os produtos de madeira, resíduos no solo da floresta e a atmosfera. O C pode ser armazenado ao longo do tempo, enquanto o estoque de C na biomassa se reacumula com um novo crescimento da floresta (GUSTAVSSON et al., 2013). O período de rotação dos povoamentos florestais varia de décadas a mais de um século. Após a colheita da floresta, inicia-se outro ciclo de acumulação de C em biomassa viva. Se as árvores não forem colhidas, a biomassa florestal alcançará equilíbrio dinâmico, e a quantidade de C absorvida pelo crescimento das árvores será equilibrada pelo C liberado pela respiração das árvores vivas e pela decomposição de árvores mortas (GUSTAVSSON et al., 2013).

Embora a absorção de C possa ser maximizada em florestas maduras, a colheita sustentável de madeira e sua aplicação em produtos de ciclo de vida longo permite que os benefícios do C armazenado durante o crescimento das árvores sejam potencializados (RAMAGE et al., 2017). Pesquisadores do *Consortium for Research on Renewable Industrial Materials* – CORRIM – afirmam que estratégias de manejo florestal afetam o nível de armazenamento de C em árvores, e indicam rotações mais curtas podem armazenar um total superior de C do que colheitas com rotações mais longas (PEREZ-GARCIA et al., 2005; LIPPKE et al., 2004). Assim, no contexto da CC, a colheita sustentável de madeira para aplicação em bens duráveis

representa uma oportunidade armazenar maior quantidade de C do que seria possível com amadurecimento natural das florestas (RAMAGE et al., 2017).

A FIGURA 6 indica fluxos de C no ciclo de vida de produtos florestais madeireiros, inclusive que podem ser aplicados em substituição a produtos não-florestais. Os fluxos de C são dependentes do tempo. O C armazenado acompanha o período de vida da árvore; o ciclo de vida do produto de madeira até que seja eventualmente liberado novamente na atmosfera por meio da combustão ou decomposição da madeira (GUSTAVSSON et al., 2013; GUSTAVSSON; SATHRE, 2004), e dessa forma o ciclo do C continua.

FIGURA 6: FLUXOS DE GEE E ESTOQUES DE C DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS FLORESTAIS MADEIREIROS.



FONTE: Tradução da autora, com base em Gustavsson et al. (2013) a partir de Sathre and Gustavsson (2012).

Neste ciclo, o tempo decorrido entre as emissões e remoções de GEE pode ser significativo para o forçamento radiativo<sup>4</sup> e, conseqüentemente, os impactos em relação às mudanças climáticas. A análise do forçamento radiativo cumulativo pode ser usada para comparar o impacto de diferentes sistemas de construção nas mudanças climáticas, quando se considera a influência do horizonte temporal entre emissões e remoções de GEE (GUSTAVSSON et al., 2013). Apesar do exposto, estes fatores não são o foco da presente pesquisa, pois são dependentes pelo fato de o horizonte temporal do ciclo de vida da edificação não fazer parte do escopo desta avaliação.

<sup>4</sup> o forçamento radiativo cumulativo mede a quantidade total de energia adicionada ao sistema terrestre e pode representar a mudança da temperatura da superfície e, conseqüentemente as perturbações nos sistemas físico, ecológico e social (GUSTAVSSON et al., 2013).



### 2.5.2 Edificações de madeira e o ciclo de carbono

O ciclo de vida de edificações de madeira pode ser ainda mais complexo do que do fluxo do C em materiais de madeira, ao passo que envolve fluxos de materiais e energia entre diversos setores, incluindo os setores florestal, de manufatura, de construção, de energia e de gestão de resíduos, todos interligados com as atividades de fornecimento de energia (TAKANO et al., 2013).

Para sistemas baseados em madeira, a análise da pegada de C deve levar em conta todos os insumos e produtos ao longo do tempo em todas as etapas do processamento, desde a regeneração e manejo florestal, colheita, processamento do produto, uso do produto, manutenção e disposição final da madeira (TAKANO et al., 2013).

A análise do balanço de GEE e de energia primária ao longo do ciclo de vida de edificações de madeira é altamente complexa e inclui inúmeras incertezas e questões metodológicas (GUSTAVSSON et al., 2013). As fronteiras temporais do sistema, por exemplo, devem considerar a vida útil da estrutura e dos demais materiais empregados na edificação. Em se tratando do ciclo de vida de materiais de madeira, devem ser considerados fatores como a dinâmica do crescimento da floresta e o período de armazenamento de C em materiais de construção de madeira durante a vida útil da edificação (GUSTAVSSON et al., 2013).

Pawelzik et al. (2013) mencionam que contabilização ou não do C armazenado em materiais de base biológica ainda é discutida. Os autores discorrem sobre duas principais abordagens para a contabilização do C biogênico: 1) uma delas é que o C biogênico pode ser contabilizado como armazenamento, pois atrasa o forçamento radiativo dos GEE e pode compensar as emissões atmosféricas atuais de CO<sub>2</sub>, já que o CO<sub>2</sub> absorvido na fotossíntese é retido dentro do material vários anos; 2) na outra abordagem, o C biogênico é considerado neutro e, portanto, deve ser excluído da análise de inventário em uma ACV, já que é reversível e inevitavelmente resultará em emissões futuras de CO<sub>2</sub> (PAWELZIK et al., 2013).

Lippke et al. (2010) afirmam que o C armazenado em produtos de madeira pode ser considerado um complemento ao C estocado na floresta, e que representa um estoque crescente de C, que só diminui por meio dos produtos que chegaram ao final de sua vida útil. Os autores consideram a transferência de C da floresta para os materiais como uma emissão negativa em relação às emissões positivas oriundas

dos processos de fabricação. A partir desta abordagem, Lippke et al. (2004) afirmam que, na ACV de materiais, olhar apenas para os aspectos de substituição na comparação entre materiais para usos equivalentes na construção, não incluindo o C armazenado nos produtos de madeira, esconde as muitas oportunidades para redução de emissões de C na CC (LIPPKE et al., 2004).

Para esse mesmo contexto, as diretrizes para o desenvolvimento de inventários de GEE do IPCC indicam diferentes formas de computar as emissões de produtos de madeira – *Harvested Wood Products* (HWP) (IPCC, 2006; IPCC, 2019c). O capítulo 12 do volume 4 do *Refinement*<sup>5</sup> atualiza as diretrizes do IPCC de 2006 quanto aos parâmetros técnicos para estimar as emissões e remoções de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) decorrentes de HWP. A orientação neste capítulo mantém as abordagens existentes cobertas pelas Diretrizes do IPCC de 2006, e também levam em consideração novas informações científicas relevantes (IPCC, 2019c).

No que se refere a remoções de CO<sub>2</sub>, IPCC (2019c) ressalta que os HWP não sequestram carbono diretamente da atmosfera. Precisamente, o carbono do CO<sub>2</sub> originalmente sequestrado pela vegetação é transferido para o **estoque de HWP**<sup>6</sup>, da mesma forma que o C é transferido do estoque de carbono da biomassa acima do solo para os estoques de carbono da serrapilheira<sup>7</sup> e carbono contido no solo. A diferença é que as transferências de carbono da vegetação para HWP são sempre o resultado de atividade antropogênica (IPCC, 2019c). Quando os estoques de HWP aumentam com o tempo, isso corresponde a remoções líquidas de CO<sub>2</sub> de HWP; quando os estoques de HWP diminuem ao longo do tempo, isso corresponde às emissões líquidas de CO<sub>2</sub> provenientes de HWP (IPCC, 2019c).

---

<sup>5</sup> a partir de 2014, uma avaliação técnica das diretrizes de inventário de GEE preconizadas pelo IPCC foi conduzida, que revelando que houve abundante conhecimento científico e empírico publicado desde 2006, que deveriam ser levados em consideração pelo IPCC. A partir disso, esforços foram direcionados para refinar a orientação metodológica das diretrizes do IPCC. O objetivo deste documento - intitulado 2019 *Refinement of 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* – foi atualizar, suplementar e/ou elaborar diretrizes para os pontos do IPCC 2006 onde foram identificadas lacunas ou dados desatualizados. Portanto, o Refinement 2019 deve ser utilizado conjunto com as Diretrizes do IPCC de 2006 (IPCC, 2019a);

<sup>6</sup> o carbono retido em HWP constitui um estoque de carbono que foi sequestrado originalmente pelo estoque de carbono da biomassa acima do solo de florestas e outras categorias de terras produtoras de madeira (IPCC, 2019c);

<sup>7</sup> camada formada pela deposição dos restos de plantas e acúmulo de material orgânico vivo em diferentes estágios de decomposição que reveste superficialmente o solo ou o sedimento aquático. É a principal via de retorno de nutrientes ao solo ou sedimento.



De acordo com IPCC (2019c) quatro diferentes abordagens podem ser adotadas para estimar as emissões e remoções de CO<sub>2</sub>, ou fluxos de carbono, decorrentes de HWP: **'mudança de estoque'** (*'stock-change'*), **'produção'** (*'production'*), **'fluxo atmosférico'** (*'atmospheric-flow'*), **'decomposição simples'** (*'simple-decay'*). Contudo, para o contexto de desenvolvimento deste trabalho, optou-se por não discorrer, nem aplicar estas abordagens mais profundamente, já que as diretrizes do IPCC (2019c) se referem a HWP “em uso”, e a fronteira de análise deste estudo se limita à análise dos produtos lenhosos até o seu processo de produção (fase de produto) e, portanto, não envolvea fase de uso, como será indicado adiante no capítulo 4 - MÉTODO (pág. 102).

Com o intuito de discorrer sobre o potencial de estoque em HWP, informações sobre a potencial imobilização do carbono nos produtos avaliados neste trabalho são apontadas nos resultados como uma informação adicional. Contudo, a dinâmica dos fluxos de carbono em HWP não é o foco deste trabalho, pois seria dependente do horizonte temporal do ciclo de vida da edificação, que não faz parte do escopo desta avaliação.

## 2.6 SISTEMA CONSTRUTIVO *WOOD FRAME*

O WF é um sistema construtivo estruturado em perfis e painéis de madeira que, em combinação com outros materiais, proporciona uma edificação durável, confortável, protegida de intempéries e fogo (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Dentre suas características estão a leveza de seus componentes, execução simples e com pouca mão de obra, e a limpeza do canteiro (ESPÍNDOLA, 2010). Segundo American Wood Council (2014), edificações WF são econômicas em termos de execução e operação - aquecimento a resfriamento da edificação, proporcionam conforto ao usuário, sendo um método construtivo adaptável a estilos arquitetônicos.

Os países que utilizam o WF em edificações apresentam diferentes formas de aplicação do sistema (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Madeira maciça ou materiais engenheirados de madeira são tipicamente utilizados na estrutura

juntamente com painéis de madeira em um ou nos dois lados da vedação vertical<sup>8</sup>. O revestimento é conectado à estrutura com pregos, parafusos ou grampos de aço. O revestimento interno geralmente é feito com placas de gesso; e como revestimento externo são aplicadas tábuas de madeira, painéis de PVC entre outros materiais. Materiais isolantes são geralmente aplicados em paredes externas, entrepisos, cobertura ou até mesmo na fundação (entre o terreno e primeiro andar), de forma a tornar a edificação termicamente eficiente e confortável ao usuário. A aplicação de impermeabilizantes e barreira de vapor - geralmente feitos por meio de membrana - evita que umidade penetre na parede estrutural ou ainda que condense internamente aos painéis de fechamento e/ou revestimento (AWC e AF&PA, 2001; MALESZA; MIEDZIAŁOWSKI, 2017; ESPÍNDOLA, 2017; MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010; CMHC, 2013).

Espíndola (2010) propõe a descrição do WF em subsistemas, sendo eles: fundação, piso, parede e cobertura, como indicado na FIGURA 7. Divisão semelhante é, em geral, observada em manuais internacionais do sistema construtivo, como AWC e AF&PA (2001), THALLON (2008), CMHC, 2013, AWC, 2015). O subsistema parede, ou vedação vertical, é o foco do desenvolvimento deste trabalho.

AS PAREDES DO SISTEMA WF SÃO FORMADAS POR ESTRUTURA COMPOSTA POR MONTANTES VERTICAIS LIGADOS A TRAVESSAS INFERIORES E SUPERIORES, EM CONJUNTO COM PAINÉIS ESTRUTURAIS DE MADEIRA, COMO OSB E COMPENSADO, QUE ALÉM DE SEREM ELEMENTOS DE FECHAMENTO, TÊM FUNÇÃO DE PROPORCIONAR CONTRAVENTAMENTO (CMHC, 2013, ESPÍNDOLA, 2017). ALÉM DESTES PAINÉIS, DIVERSOS TIPOS DE FECHAMENTO SÃO UTILIZADOS COMO: MADEIRA SERRADA, *FIBERBOARD*, PLACA DE GESSO, ENTRE OUTROS (CMHC, 2013). PODEM SER ACRESCENTADOS TRAVAMENTOS ENTRE OS MONTANTES OU NA DIAGONAL DA ESTRUTURA (ESPÍNDOLA, 2017). A

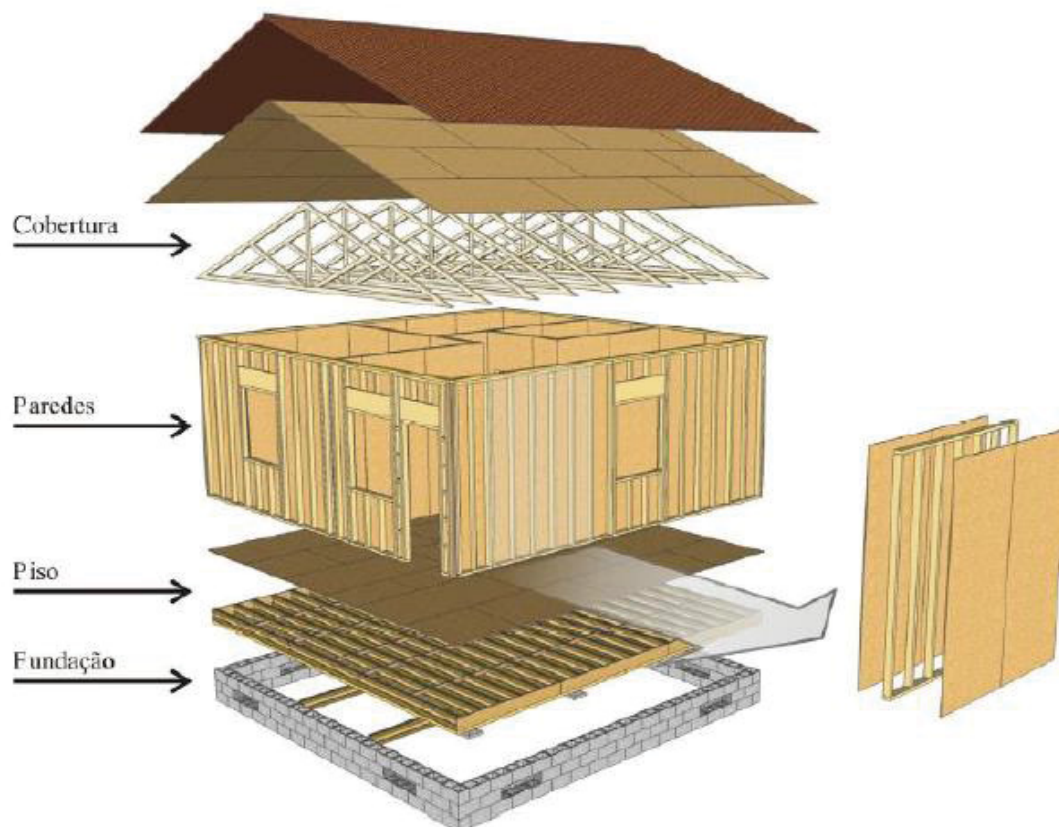
FIGURA 8 indica os principais componentes de uma parede em WF.

Além dos elementos estruturais característicos de madeira do sistema WF, outros elementos compõem as camadas internas, intermediárias e externas das paredes. As composições de materiais são variadas.

---

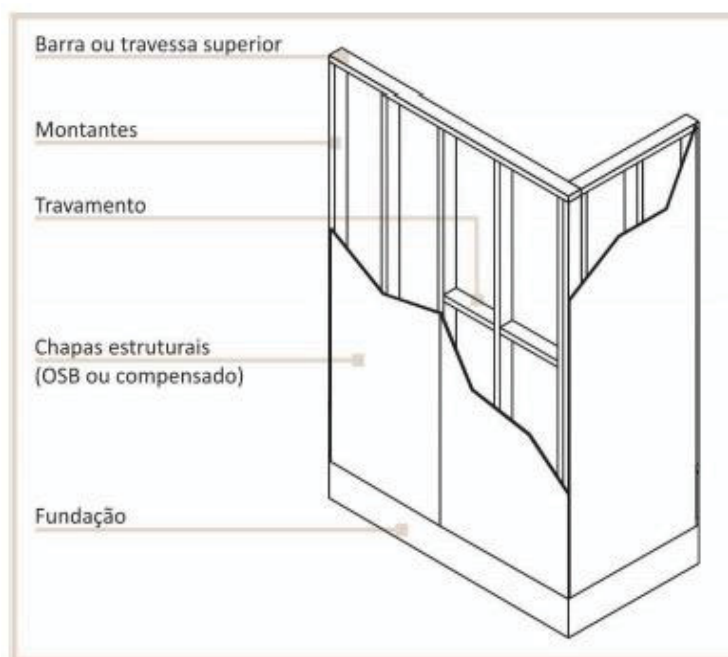
<sup>8</sup> Neste trabalho, vedações verticais se referem ao conjunto de materiais estruturais, fechamento e acabamento das paredes em WF.

FIGURA 7: SUBSISTEMAS DE UMA EDIFICAÇÃO WF.



FONTE: Espíndola (2010).

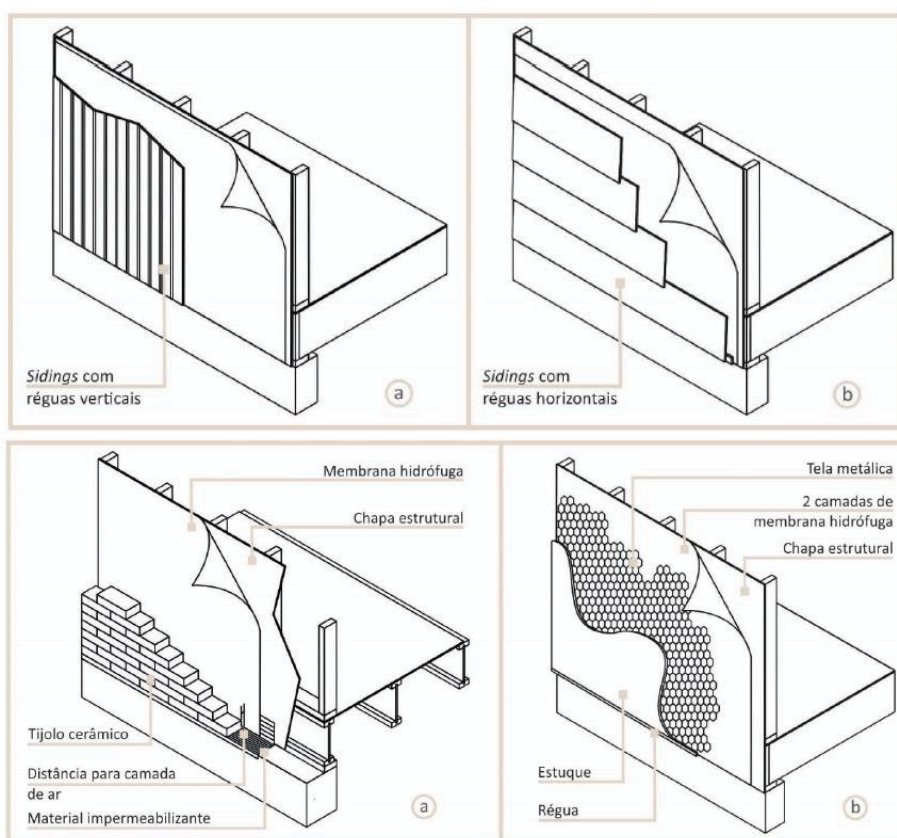
FIGURA 8: COMPONENTES DE ESTRUTURA DE PAREDE.



FONTE: ESPÍNDOLA (2017), adaptado de APA (2016).

Nas camadas externas, geralmente é aplicada uma membrana hidrófuga no painel de madeira, que evita a entrada de água e permite a saída de umidade interna em forma de vapor. Após esta membrana são aplicados os acabamentos, sendo os mais comuns em *sidings* de madeira ou PVC aplicados verticalmente ou horizontalmente; tela de estuque ou revestimento argamassado entre outros; placas cimentícias; ou até mesmo tijolos cerâmicos (ESPÍNDOLA, 2017; APA, 2016; CMHC, 2013; MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010), como ilustra a FIGURA 9.

FIGURA 9: DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTO EXTERNO DO SISTEMA WF.



FONTE: ESPÍNDOLA (2017), adaptado de APA (2015).

Como revestimento interno da parede, placa de gesso é o acabamento interior mais utilizado devido à sua velocidade de instalação, baixo custo, e resistência ao fogo (CMHC, 2013; ESPÍNDOLA, 2017). A placa pode ser diretamente aplicada na estrutura de madeira ou ser fixada sobre o painel de madeira (ESPÍNDOLA, 2017).

### 2.6.1 *Wood Frame* no Brasil

No Brasil, métodos tradicionais estão lentamente dando lugar aos sistemas industrializados de construção (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). O WF começou a ser aplicado no Brasil no início de 2010 e até a conclusão deste trabalho, ainda está em processo de normatização. O sistema construtivo é considerado inovador no Brasil pelos preceitos do Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais - SiNAT, e mediante o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat -PBQP-H (ESPÍNDOLA, 2017). O SiNAT tem como papel a proposição de procedimentos para avaliar produtos que ainda não possuem normas técnicas prescritivas em vigência, buscando aumentar a competitividade do setor produtivo.

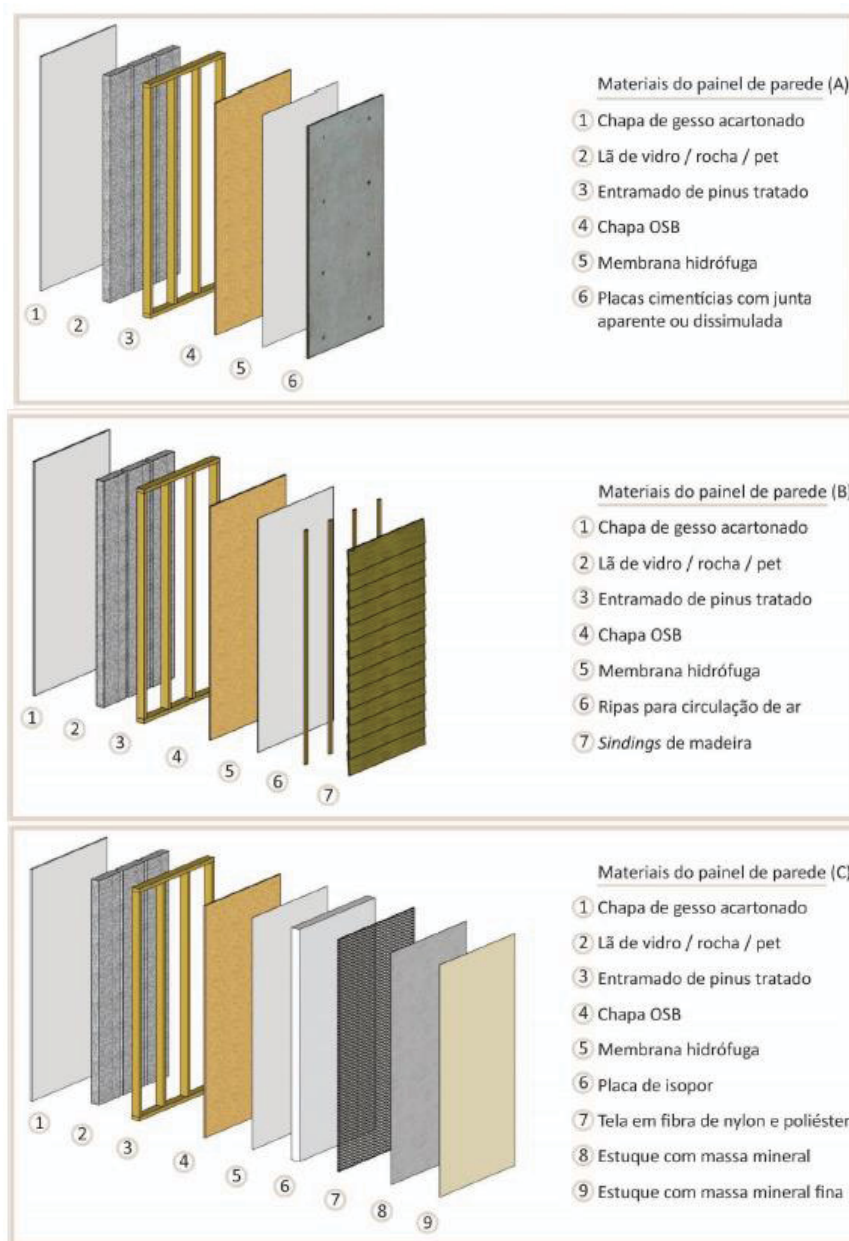
Nesse contexto, em 2011, a partir de uma iniciativa da comunidade técnica brasileira, o WF passou por um processo de avaliação, e a diretriz SiNAT Nº 005 - Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas - foi criada para sua avaliação técnica enquanto não há uma norma técnica nacional publicada (ESPÍNDOLA, 2017). Sendo assim, a SiNAT Nº 005 é documento em vigor que estabelece diretrizes para as características e desempenho técnico de edificações em WF.

A SiNAT Nº 005 define o WF como um sistema construtivo cuja principal característica é ser formado por peças estruturais de madeira maciça serrada com fechamento em chapas, além dos componentes de madeira utilizados nos pisos e coberturas. O revestimento externo pode consistir em painéis OSB ou compensado quimicamente tratados, aplicado em conjunto com placas cimentícias. Como revestimento interno, além dos painéis de madeira, é necessário aplicar uma placa de gesso. Como isolamento térmico, podem ser aplicados materiais como lã de rocha, lã de vidro, placa de poliestireno expandido (EPS) dentre outras opções equivalentes. Quanto à impermeabilização, é necessário aplicar uma membrana hidrófuga. Quanto ao acabamento, *sidings*, placas cimentícias ou revestimento argamassado com acabamento com tinta ou textura podem ser aplicados (PBQP-H, 2017).

Em pesquisa sobre o mercado brasileiro de WF, Espíndola (2017) observou que, em geral, empresas brasileiras executam o sistema com fundação em *radier* ou em blocos de concreto; paredes constituídas por painéis estruturados de madeira,

entrepiso com vigas de madeira maciça ou vigas I, e cobertura com estrutura de madeira. Espíndola (2017) notou também que a solução construtiva do subsistema parede é a que mais varia entre as empresas, e notou três principais soluções construtivas, apontadas na FIGURA 10.

FIGURA 10: SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DO SUBSISTEMA PAREDE MAIS ENCONTRADAS NO BRASIL.



FONTE: ESPÍNDOLA (2017).

De acordo com Espíndola (2017), o modelo mais usual de aplicação é composto por: (1) gesso acartonado, acabamento interno como pintura e/ou azulejos cerâmicos, (2) isolante em lã de vidro ou rocha, (3) estrutura em madeira pinus



tratado com CCA em autoclave, (4) chapa OSB, (5) membrana hidrófuga e (6) vedação externa e acabamento. Dentro do subsistema parede, a autora afirma que o revestimento externo é o que mais varia nas composições, e observou 3 tipos diferentes de acabamento externo (A) placa cimentícia, (B) *sidings* em madeira ou PVC, (C) placa de isopor, com tela de reforço e estuque com massa mineral.

Espíndola (2017) também observou 3 graus de industrialização na execução de edificações em WF no Brasil, são eles: não industrializado, com produção e montagem integral dos painéis WF no canteiro, sendo este o mais aplicado pelos construtores de WF no Brasil; semi-industrializado, em que painéis abertos são produzidos nas fábricas e finalizados no canteiro após montagem; e o industrializado, em que os painéis são integralmente pré-fabricados e então levados para montagem no canteiro.

#### 2.6.1.1 A madeira empregada

De acordo com a SiNAT N° 005, madeira serrada e chapas de madeira formam a estrutura do WF. No Brasil, o gênero de madeira aplicado como matéria-prima no WF é usualmente o Pinus e, em menor escala, o Eucalipto (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Há preferência pelo Pinus, pois, além de ser um gênero de madeira mais leve, apresenta alta permeabilidade ao tratamento preservativo em autoclave, o que não ocorre com a maioria das madeiras nativas brasileiras e com Eucalipto, que são folhosas (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010; IPT, 2003). A inclinação para a madeira de coníferas pode ser notada inclusive por meio das diretrizes da SiNAT N° 005, que prescreve a madeira estrutural aplicada ao sistema como “madeira sólida serrada de coníferas, tendo a resistência à compressão característica mínima paralela às fibras, a 12% de umidade, de 20 MPa (classe C20), tratada em autoclave com tratamento preservativo” (PBQPH, 2017). Quanto à madeira serrada de folhosas, a SiNAT N° 005 menciona a possibilidade de sua aplicação em telhados, sob a condição de alta resistência natural ao ataque de organismos xilófagos (PBQPH, 2017).

Devido ao clima quente e úmido do país, a estrutura de madeira deve receber um tratamento preservativo para tornar a madeira resistente ao ataque de organismos xilófagos, aumentando assim a sua durabilidade (PBQPH, 2017). A

diretriz prescreve os tipos, bem como os requisitos mínimos para retenção do tratamento preservativo da madeira a ser aplicada no sistema.

Quanto às chapas de madeira empregadas, painel OSB ou chapa de compensado são empregados. A chapa de OSB é uma chapa estrutural constituída por tiras de madeira, unidas com resinas resistentes à água, orientadas em três ou cinco camadas perpendiculares entre si e prensadas sob alta pressão e temperatura (PBQPH, 2017). No Brasil, o OSB é produzido principalmente com madeira de *Pinus* spp. principalmente *elliottii* e *taeda* (FERRO et al., 2018), e no seu processo de produção há a aplicação de termicida, com o objetivo de aumentar a resistência ao ataque de organismos de degradação, enquanto em outros países não há evidência da aplicação deste produto (FERRO et al., 2018). Além disso, a resina MDI (diisocianato de difenilmetano) é o único aglutinante utilizado para produzir OSB para usos estruturais no setor brasileiro da construção, enquanto em países norteamericanos resinas de fenol-formaldeído são utilizadas para adesão das tiras de madeira do OSB nas camadas superficiais, e o MDI é somente utilizado para adesão das tiras da camada central (FERRO et al., 2018).

A chapa de compensado consiste em um painel de madeira formado por um conjunto de lâminas de madeira coladas entre si, com a orientação das fibras perpendicular entre lâminas sucessivas (PBQPH, 2017). Assim como a madeira serrada, as chapas de compensado também devem receber tratamento preservativo para serem empregadas no sistema WF no Brasil.

A indústria de compensado tem dificuldades para obter madeira de qualidade com as dimensões necessárias para extrair as lâminas utilizadas na fabricação do produto, ao passo que a indústria de OSB pode utilizar madeira de menor qualidade, e toras de comprimento e diâmetro irrestrito, bem como espécies de crescimento rápido (FERRO et al., 2018), motivo pelo qual o compensado é geralmente um produto mais caro (THALLON, 2008). Contudo, chapas de compensado também têm sido aplicadas no WF no Brasil.

O Referencial teórico apresentado até aqui trouxe conceitos importantes que foram base para a definição e desenvolvimento desta pesquisa. Contudo, a título de levantar o que se tem sido desenvolvido com relação ao tema e problema de pesquisa deste estudo, um levantamento do estado da arte é apresentado no próximo capítulo por meio do ARTIGO 1. Por meio dele buscou-se discutir como o sistema construtivo vem sendo aplicado, explorado e avaliado por meio da ACV no



mundo a partir de uma revisão sistemática de literatura, com uma análise qualitativa e descritiva sobre a temática.

### 3 ESTADO DA ARTE

#### 3.1 WOOD PRODUCTS APPLIED TO THE *WOOD FRAME* CONSTRUCTION

##### SYSTEM: A LIFE CYCLE ASSESSMENT SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW.

Anna Claudia Fischer<sup>1\*</sup>, Camila Yara dos Santos Sanchotene<sup>2</sup>, Marcelo Langer<sup>2</sup>, Dimas Agostinho Silva<sup>2</sup>; Sérgio Fernando Tavares<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Curitiba, Brazil;

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, Curitiba, Brazil;

#### ABSTRACT

**Purpose:** The Wood Frame construction system (WF) has gained greater application in Brazil from 2011 and is in process of standardization in the country. The WF application is still incipient in Brazil and hence the generation of information about the system and its components is important for its consolidation in the country. Considering the wood products potential environmental advantages over alternative building materials, reporting the environmental profile of the WF product chain is therefore an opportunity for research development which can be seized by the development of LCA. Hence, the purpose of this research was to investigate the progress of LCA studies related to WF construction system and wood products involved in its production chain through the survey of the scientific production on the theme worldwide, to identify research gaps and provide directions for future studies in the area, especially for the Brazilian context. A systematic literature review was conducted, followed by a bibliometric and bibliographical analysis of the selected studies. The databases used were ProQuest, EBSCO, Scopus, Web of Science and Engineering Village, between 2002 and 2019. Ninety-one articles were analyzed, providing a broad overview of the most recent research in the theme. The analysis was conducted in five thematic axes: Forest Operations; Wood materials; WF buildings; Comparison of Construction Systems; and Literature Review. The temporal and spatial analyses of the studies indicate that publications in the theme have concentrated in the last 5 years, mainly in Europe and North America, which hold around 90% of publications on the theme worldwide. It was possible to establish a framework of the theme and its evolution, identifying scientific gaps which could be explored in future LCA studies in the theme. The lack of regional primary LCA data was a recurring gap in the thematic axes. Cradle-to-gate LCAs were predominant, with few studies considering the end-of-life scenarios. The review reported an embryonic development of LCA studies in the theme in Brazil. It should be noted that the theme presents many opportunities for scientific development worldwide, and in this sense, the LCA application stands out both for the environmental profile evaluation of the construction system, and as a management tool to promote improvements in its production. The research gaps pointed out should be considered while carrying out LCA studies in the theme.

**Keywords:** *LCA; roundwood; sawnwood; timber; lumber; oriented strand board; plywood; construction system.*

### 3.1.1 INTRODUCTION

The construction industry is of great social, economic and especially environmental importance, as it has a major contribution to global environmental loads: it is responsible for the emission of approximately 30% of greenhouse gases (GHG); applies about 12% of drinking water (UNEP, 2009; UNEP, 2016), and consumes about 50% of the material resources extracted from nature by man (EDWARDS, 2008), this last one associated to a large waste production by the industry - almost 40% of municipal solid waste in the world (UNEP, 2009; UNEP, 2016). Given the representativeness of resource consumption, waste and GHG emissions generation by the construction industry, the promotion and maintenance of sustainability in the sector are essential.

In addition to the above mentioned impacts, the building sector also represents more than a third of total world energy consumption (IEA, 2013; UNEP, 2009), and discussions about the potential contribution of the construction sector to climate change mitigation have shown a dominant concern regarding energy efficiency during the operational phase of the building life cycle (HAFNER; RUTER, 2018). Most recently, however, researchers have been arousing interest in the energy and associated emissions incorporated to building materials, given the fact that, as buildings become more energy efficient and less dependent on fossil fuels, the contribution of GHG emissions from the pre-operational phase of buildings tends to become larger than the one from the operational phase (IDDON; FIRTH, 2013, BERGMAN; KAESTNER; TAYLOR, 2016; HAFNER; RUTER, 2018). Thus, the minimization of impacts from primary energy consumption and GHG emissions associated to materials manufacturing has gained more attention, and along with that, opportunities for LCA research in this stage of the product chain have gained strength.

Among the materials applied in construction, wood presents itself as a renewable building material, which has environmental advantages over other alternative building materials (BERGMAN et al., 2014). By analyzing the life cycle of wood production, it is usually a material that requires less industrial processing and also that can be used in substitution of materials that require more energy in their production processes, especially from fossil sources, and hence associated with high GHG emission in the atmosphere, such as concrete, ceramic bricks, aluminum, and steel (BUCHANAN; LEVINE, 1999). Moreover, the structural, thermal, acoustic and

environmental properties of wood materials also make them a favorable option for construction application (ASDRUBALI et al., 2017). In addition to the physical properties and environmental factors that favor the application of wood as a building material, economic and practical factors are also involved: current building systems that apply wood can be highly prefabricated and quickly assembled at the construction site (RAMAGE et al., 2017), as wood is a suitable material for the industrialization of elements, so as to facilitate their transport and assembly, minimizing the need for complex construction site infrastructures (ASDRUBALI et al., 2017).

In the sense of wood application for durable purposes in the construction industry, the Wood Frame (WF) construction system is a lightweight system which has wood as its characteristic material. It is structured in wood profiles which are applied along with various other materials and, by allowing total or partial industrialization, results in fast assembly technique which can promote the reduction of construction solid waste generation, hence contributing to a more rational use of natural resources. Besides, WF buildings are economical in terms of construction and operation - heating and cooling of the building, providing comfort to the user, being a constructive method adaptable to architectural styles (AWC, 2014).

Even though the WF construction system is widely applied with excellence and quality in North America, Europe and Asia, its application in Brazil is recent, officially dating back from 2011, with the publication of the SiNAT 005 Guideline, which temporarily regulates lightweight timber construction systems in the country until an official national standard is published (ESPÍNDOLA, 2017). As it is usually considered a competitive, fast and more environmentally sustainable construction system, the WF presents itself as a good option for the mitigation of housing deficit in Brazil - in 2017 estimated at 7.77 million units according to a recent study by the Brazilian Association of Real Estate Developers (Abrainc) (MARKO, 2018). A consequence of this deficit is the need for fast housing and infrastructure production, indicating an opportunity for the use of industrialized timber systems to solve this social issue - intimately connected to an environmental concern – since their use may also contribute to the reduction of urban solid waste, GHG emissions and the extraction of non-renewable natural resources by construction industry. Thus, given that the WF building system is still standardization and expansion process in Brazil, and also that the system consolidation faces some social and cultural barriers, as the

country has adopted reinforced concrete and ceramic bricks masonry as its conventional construction technique (MUNARO et al., 2018), it is possible to point out the need to generate information about it, for the wood-based industry, professionals related to the construction industry and for the population.

The generation of information about the environmental profile of the WF construction system and its materials is therefore an opportunity for research development and which can be seized by the development of LCAs in this context, as it is a technique carried out according to internationally recognized protocols with the goal of evaluating a product or process for its impacts. As a result, this study aims to provide a comprehensive view of academic research on LCA applied to the WF building system, in order to identify research gaps and provide directions for future studies in the area, especially for the Brazilian context. For this, we used the technique of systematic literature review, with qualitative as well as descriptive and thematic data analysis, investigating how the construction system has been applied, explored and evaluated through LCA worldwide.

Following this introduction (Section 1), a theoretical background on LCA (Section 1.1) and the WF building system (Section 1.2) is presented. Section 2 presents the search method, followed by Section 3, which presents the results. Section 4 presents the discussion and section 5 the final considerations.

#### 3.1.1.1 Life Cycle Assessment

LCA can be interpreted as a methodological tool that applies life-cycle thinking quantitatively in environmental analysis of processes or products (FU et al., 2014). It is a standardized technique for assessing environmental aspects and potential impacts associated with a product by inventorying the input and output flows of matter and energy in its life cycle (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Such flows can be quantified within the entire life cycle of the product or product system, from extraction and acquisition of raw materials (cradle), to eventual disposal (grave), based on established objective and scope (ISO, 2006a).

LCA is standardized by the International Organization for Standardization (ISO) through ISO 14040 and 14044 directives (ISO, 2006a; ISO, 2006b) and, according to its framework, is officially structured in four phases: i. the *Goal and scope definition* phase, which involves the description of the system to be evaluated,

the definition of the study boundary and its level of detail, as well as the declared unit definition in order to quantify the system and allow the determination of the reference flows; ii. the *Life Cycle Inventory Analysis (LCI)* phase, which involves data collection and calculation procedures used to quantify the matter and energy flows of the studied system, and enables the identification of limitations or the need to review the scope and objectives; iii. the *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)* phase, in which the data from the LCI phase is interpreted in terms of potential impacts; and finally, iv. the *Life Cycle Interpretation* phase, in which the results are evaluated and conclusions and recommendations are formulated in order to minimize the impacts detected in the system. In this phase, decision making can also be carried out, according to the defined objective and scope (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

From the LCA procedure, it is possible to perform a scientific assessment of the potential environmental impacts of the product or system analyzed, as well the identification of potential improvement points in the analyzed product systems and / or processes. Hence, it can be considered an environmental management tool or technique, as its results can be useful insights for a variety of decision-making processes regarding a product system towards sustainability (ISO, 2006a; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2012; ILCD, 2010). In the context of buildings, it presents itself as a powerful tool for analyzing the impact of consumption reduction measures over the entire life cycle of a building – through raw material extraction, transportation, manufacturing, use, disposal or reuse and recycling (VERBEECK; HENS, 2010).

#### 3.1.1.2 Wood Frame Construction System

The Wood Frame (WF) construction system is a lightweight system which has wood as its characteristic material. It is usually structured in wood profiles which are applied along with various other materials such as wood-based panels for sheathing, and other internal and external finishing materials.

Today, the application of building systems like this is well established in some countries. In North America, it has historically shown itself as a durable system, being that over 90% of new residential buildings are made using some version of this building method (AWC and AF&PA, 2001; THALLON, 2008). In the United Kingdom and Scotland, approximately 20% and 80% of new homes are timber structures

respectively (NHBC, 2017). In South America, Chile and Venezuela invest in the use of wood structures for popular housing (MOLINA; CALIL, 2010; ARAÚJO et al., 2016). In Brazil, however, the WF construction system began to be applied in 2010, with registers of a greater application from 2011, with the publication of the SiNAT 005 Directive, which temporarily regulates lightweight timber construction systems in the country until an official national standard is published (ESPÍNDOLA, 2017). Given that the WF construction system is still in process of standardization in Brazil, SiNAT 005 is the document in force that establishes guidelines for its characteristics and technical performance in the country.

The SiNAT 005 Guideline defines WF as a construction system composed of lightweight timber and wood-based panel sheathing - such as Oriented Strand Board (OSB) or plywood, along with layers of other materials, such as cementitious board or plasterboard. The structural bracing can be done by diagonal or horizontal timber elements, or simply by wood panels such as OSB and plywood. The system usually gets a thermal insulation material such as rock wool, glass wool, expanded polystyrene (EPS), among others; and membranes for the correct waterproofing are also applied. As for the coating, the system allows a great variety, being considered here PVC siding, mortar canvas coatings, paintings and textures, among others. According to the Guideline, the system can be used in Brazil in single-family buildings isolated or twinned, as well as in multi-family buildings of up to four floors, including the ground floor (PBQPH, 2017).

Considering the development scenario of the WF in Brazil, in order to find direction for future development of LCA in the theme to guide this research line in the country, this study aims to map the development of studies on LCA of WF buildings or the production process of the wood materials involved in the system, in a global context. Emphasis was given to the wood-based materials of the system, since wood is its characteristic material. For this, the literature review was conducted focusing on the following research questions:

How have the LCA studies of the WF building system and its components have globally evolved?

1. Where are LCA and WF studies being developed?
2. What are the main impacts involved in the construction system?
3. What are the main system-related scientific gaps?
4. How has the development of these studies been in Brazil?

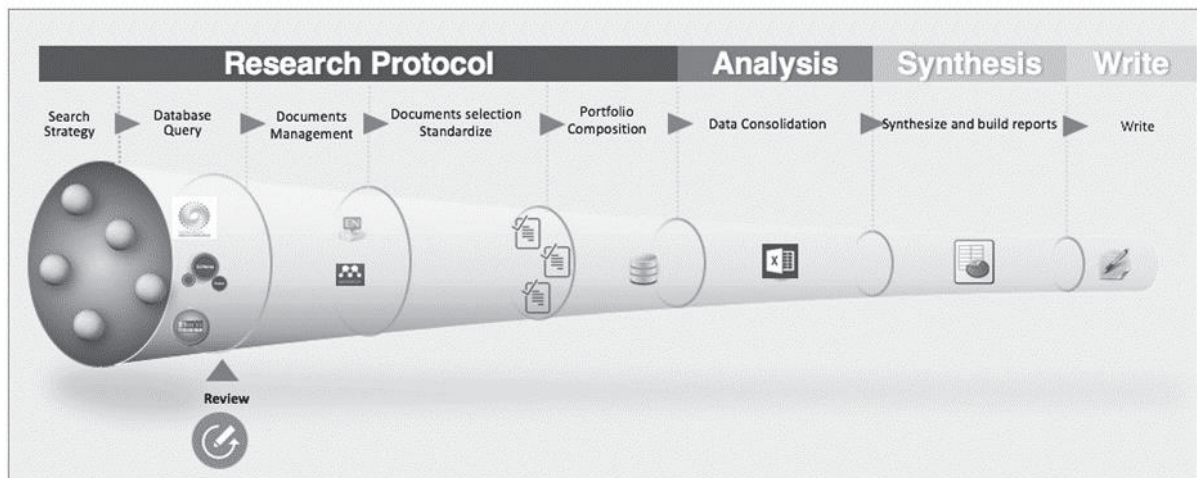


### 3.1.2 METHODS

The methodological approach of this study consisted of a qualitative and descriptive systematic literature review. For this, the Systematic Search Flow Method (SSF) proposed by Ferenhof and Fernandes (2016) was used to conduct the literature review. The SSF Method consists of four phases and eight activities, as shown in **Erro! Fonte de referência não encontrada..** The four main phases are:

- i. Research protocol definition – phase which focuses on defining the study object;
- ii. Analysis – phase which involves data consolidation in order to allow the combination and grouping of the surveyed data;
- iii. Synthesis – phase which corresponds to the synthesis and elaboration of reports. It is the point in which the most cited articles on the research theme are identified and reports are built on each analysis made;
- iv. Writing - phase intended to consolidate results through scientific writing.

FIGURE A 1: STEPS OF THE SYSTEM SEARCH FLOW LITERATURE REVIEW METHOD



SOURCE: adapted from Ferenhof and Fernandes (2016).

The Research Protocol Definition phase is divided into five steps, which were performed as follows:

#### *Step 1: Search strategy definition*

This step involved the characterization of the research strategy procedures, involving the definition of keywords, inclusion and exclusion criteria, the databases used, as well as the research time frame.



The keywords covered the LCA theme and its stages (ICV and AICV) in combination with the WF construction system and its wood components. In Brazil, according to the SiNAT 005 Guideline, the wood materials applied to the WF system are *sawnwood* as a component of the structural wall frame; and *oriented strand board (OSB)* or *plywood* as bracing components, being that, for this review, only these materials were selected. The keyword *roundwood* was also used as it refers to the raw material used in the production of all the above-mentioned wood components. Considering this, the search query used in the databases was: ("LCA" OR "LCI" OR "LCIA" OR "life cycle assessment" OR "life cycle inventory" OR "life cycle impact assessment") AND ("wood fram\*" OR "OSB" OR "oriented strand board" OR "plywood" OR "sawnwood" OR "timber" OR "lumber" OR "roundwood").

The literature search was conducted according to criteria indicated in **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, and only peer reviewed documents were included, and gray literature, such as reports, conference articles, non-academic research, as well as books and works in other languages were excluded.

TABLE A 1: SELECTION CRITERIA FOR LITERATURE REVIEW.

Criteria	Inclusion	Exclusion
Type	Available online as full articles or reviews.	Any other type of publication (e.g. books, reports, proceedings or event papers)
Language	English and Portuguese	Any other language
Time	Jan 1 <sup>st</sup> , 2002 - Jan 24 <sup>th</sup> , 2019	-
Search area	Any area	-

SOURCE: the authors (2019).

### Step 2: Database search

The literature search was performed in the following databases, since they comprise a great number of scientific journals and due to their multidisciplinary their studies and references: ProQuest, EBSCO, Scopus, Web of Science and Engineering Village. Each database has its own search particularity, so we watched out for the research patterns of each one of them, also introduced in the SSF Method. The databases were accessed using the combination of keywords and the criteria previously mentioned. The search was applied to the title, keywords, and abstract of the documents, being that each database was as follows: ProQuest (788), EBSCO (367), Scopus (276), Web of Science (259) and Engineering Village (187).

### *Step 3: Document management*

The third stage involved importing the documents returned in the databases into a reference manager software. Duplicate articles were excluded, resulting in 1044 documents.

### *Step 4: Standardization of article selection*

In the fourth step involved definition and application of criteria in order to define whether the documents resulted after step 3 had adherence to the scope of the present research. In order to be included in this review, the selected articles should fit in one of the following categories:

- i. be an LCA or LCI involving one of the following wood materials: lumber/roundwood, sawnwood/ timber, OSB, plywood or its forest operation process;
- ii. be an LCA of the WF building system as a whole;
- iii. be a comparative LCA study of the WF and other building systems.

Articles that reportedly involved LCAs for the production of wood for energy purposes, or whose focus was the methodological strategy of evaluation in relation to the environmental assessment of the product, experimental research on LCA, or whose construction system applied did not have common characteristics with the WF system applied in Brazil, even if included wood, were excluded. Thus, the titles, abstracts and keywords of the documents were read in order to verify if they were consistent with the search theme, resulting in 122 documents that met the established criteria.

Since we had a high number of publications returned in the document management phase, five thematic axes were created in order to organize the researched, filtered and selected articles. This division was defined according to the research similarity found among articles, regarding the processes involved in the product chain as well as the type of desired discussion. Hence, the documents were classified as forest operations; wood materials, wood-framed buildings, comparison of construction systems (being WF one of them); literature review.

### *Step 5: Article portfolio composition*

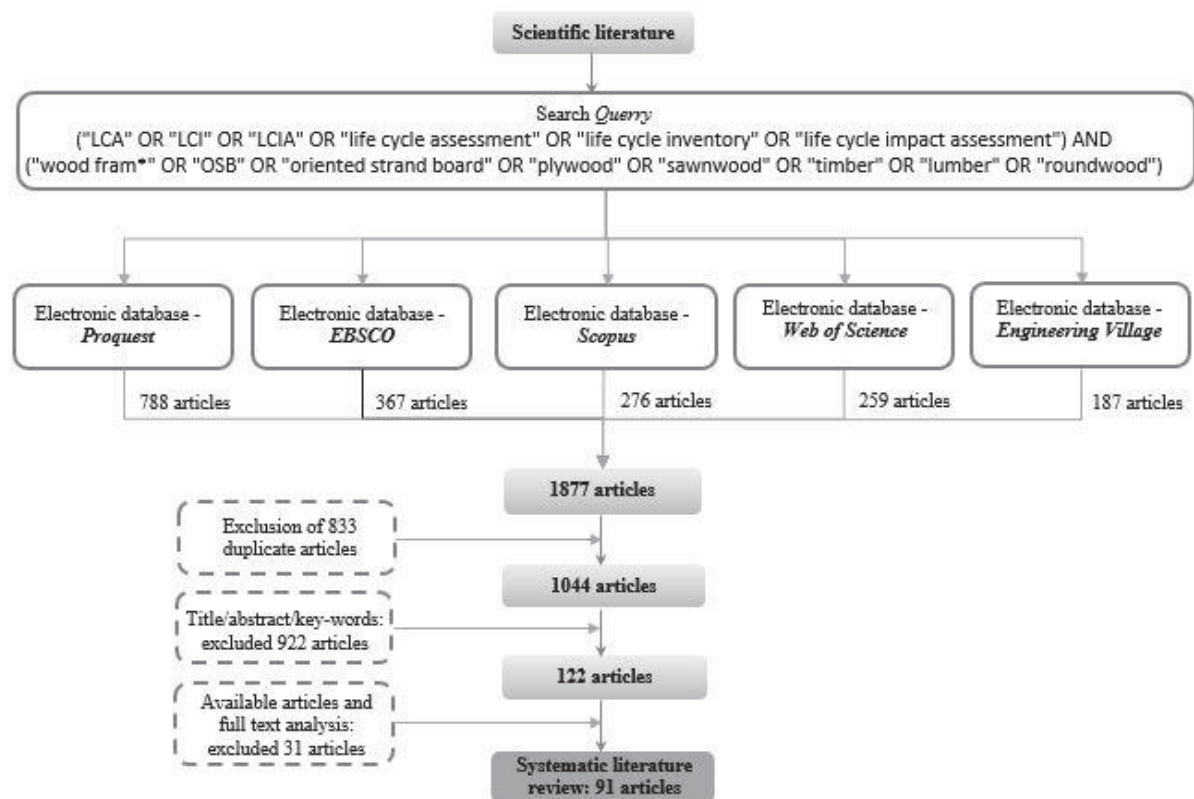
This phase involved the complete reading of all 122 selected articles. Therefore, after selecting articles based on titles, abstracts and keywords, the available documents were consulted through accessing to the full text. Among the

selected articles, 3 were not available for access through the resources consulted, resulting in 119 articles considered for full reading.

In order to organize the data accessed, a “knowledge matrix” was created on a spreadsheet which was fed with data and relevant criteria to establish the understanding of the theme. In this matrix, the bibliographic portfolio for analysis was composed, exporting from the reference management software information such as: author, publication year, title, keywords, information about journals, country of study production, type of study, evaluated product system, system boundary, declared unit, as well as identified scientific gaps.

The studies were categorized and synthesized in the knowledge matrix according to the previously specified criteria. While reading the documents, it was still possible to identify articles that did not demonstrate adherence to the scope of the theme under investigation, and 28 other articles were further excluded, resulting in 91 scientific articles included in the systematization of information, as shown in **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

FIGURE A 2: SYSTEMATIC REVIEW PROCESSING IN THE SCIENTIFIC LITERATURE.



SOURCE: the authors (2019).

The final stage of the review process was devoted to the construction of bibliometric analysis of the selected studies, followed by the description of the scientific literature involved in the review and the gaps identified.

### 3.1.3 RESULTS ANALYSIS

In the results section, a descriptive analysis of the studies developed on the subject is presented by means of a bibliometric analysis of the articles returned and selected, followed by a qualitative analysis of the gathered information and description of the main findings/ conclusions.

#### 3.1.3.1 Descriptive analysis

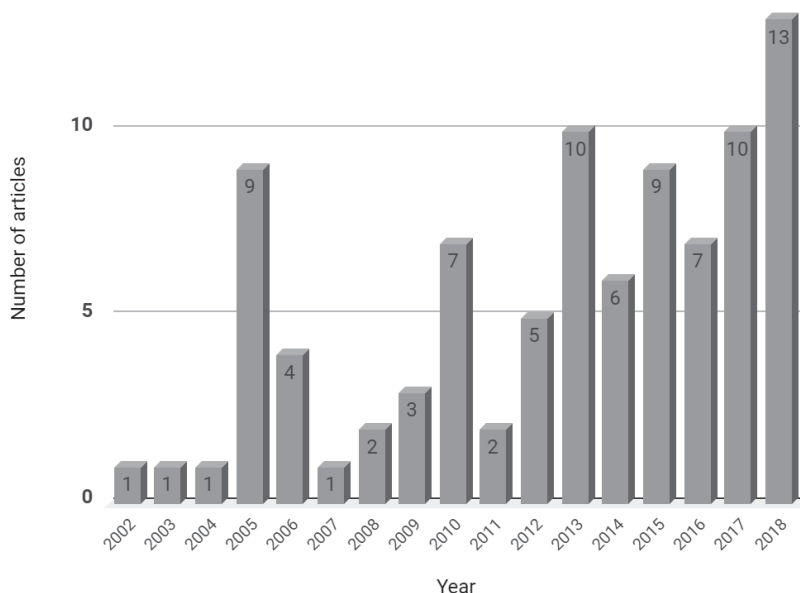
This study was conducted considering a timeframe from January 1<sup>st</sup>, 2002 to January 24<sup>th</sup>, 2019. The year of 2002 was set as the initial search boundary due to the launch of Life Cycle Initiative - a public-private partnership which fosters global sustainable development by promoting life cycle thinking and facilitating knowledge exchange around the world – which has fostered the development of credible science-based LCA studies (LIFECYCLE INICIATIVE, 2019).

It is possible to note that the research theme – scope of the present study - and its ramifications has gained strength in recent years. The last 5 years corresponded to approximately 60% of the publications considered in this review (54 papers). This brings evidences of a growing interest of the scientific community in assessing the environmental impacts of wood materials, as well as in construction systems that have wooden composites as their characteristic material, or even in comparing them to other construction systems. Besides, there are more publications with this scope in 2018, fact which points to an ongoing search for LCA studies related to theme. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** illustrates the development of publications in the theme.

The 91 articles included in this review are distributed in 39 journals, involving journals focused on the forest products industry, LCA and cleaner production processes, scopes which could be considered interdisciplinary regarding the theme. The four most representative journals among the publications were the Journal of Cleaner Production (18%, 16 articles), Wood and Fiber Science (15%, 14 articles),

Forest Products Journal (8%, 7 articles) and the International Journal of Life Cycle Assessment (8%, 7 articles).

FIGURE A 3: DEVELOPMENT OF PUBLICATIONS WITHIN THE REVIEW TIMEFRAME.



SOURCE: the authors (2019).

Thirteen journals held 71% (65 articles) of the total publications analyzed in this review and are shown in **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, which lists the indexed scientific journals with at least 2 publications included in this review. It is possible to note that, in general, most of the journals relevant in the theme present a high impact factor, which emphasizes the relevance of the subject in the present study matter and its correlated areas. Journal of Cleaner Production, stands out with more publications in the theme as well as the highest impact factor in 2018, according to Web of Science Journal Citation Reports (JCR).

Most of the scientific journals which hold the publications returned in this review are focused on environmental issues and sustainability, or which involve the encouragement and application of cleaner products and systems. Journals with related research scopes such as Journal of Cleaner Production, International Journal of Life Cycle Assessment, Science of the Total Environment and Resources Conservation and Recycling - address environmental aspects and sustainability of products, and present research which focus on more sustainable production and consumption systems. Likewise, there are journals as Energy & Buildings and Building and Environment which have as common topics of interest the assessment

and promotion of sustainability in the built environment. Finally, Wood and Fiber Science, Forest Products Journal and Forest Ecology and Management represent the forestry journals, contributing with publications related to the study of forest resources, wood and lignocellulosic materials.

TABLE A 2: INCIDENCE OF PAPERS PER JOURNAL IN THE SYSTEMATIC REVIEW.

SCIENTIFIC JOURNAL	Nº OF PUBLICATIONS	IMPACT FACTOR (JCR) <sup>1</sup>
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	16	6.395
WOOD AND FIBER SCIENCE	14	0.848
FOREST PRODUCTS JOURNAL	7	0.609
INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE	7	4.868
SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	3	5.589
ENERGY & BUILDINGS	3	4.495
SUSTAINABILITY	3	2.592
BUILDING AND ENVIRONMENT	2	4.820
RESOURCES CONSERVATION AND	2	7.044
JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY	2	4.826
JOURNAL OF GREEN BUILDING	2	. <sup>2</sup>
BIORESOURCES	2	1.396
FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT	2	3.126

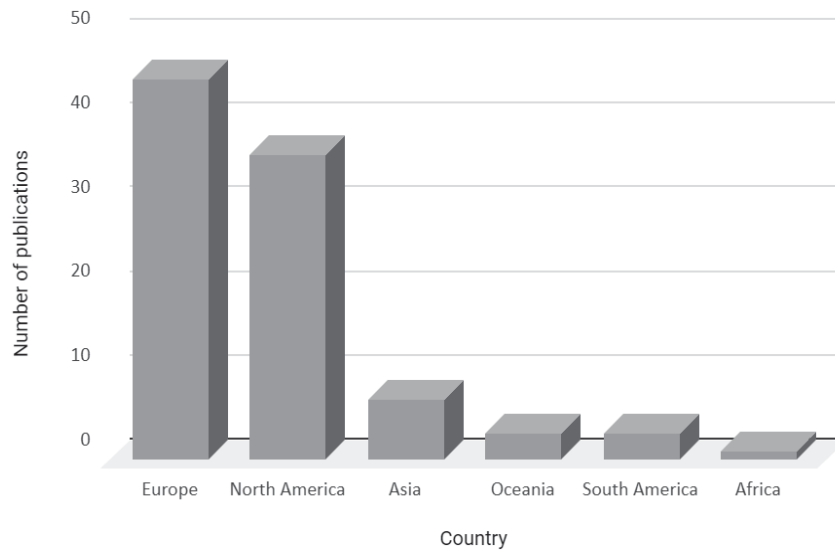
SOURCE: the authors (2019).

<sup>1</sup>2018 Journal Impact Factor according to Web of Science Journal Citation Reports (JCR)

<sup>2</sup>No results found for the journal on Web of Science Journal Citation Reports (JCR)

The importance of discussing the geographical provenance of LCAs and LCIs – based either on primary or secondary data - lies in the fact that they suffer from the technological and geographical influence of where the processes occur. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** shows the origin of the research according to the geographic coverage indicated in the analyzed LCA/ LCI studies (based on the location considered in the studies). It is observed that the predominance of research is in North American and European countries. Europe represented 50% of published works (45 articles) covering 18 countries, followed by North America with 40% (36 articles). Together, the two continents accounted for 90% of the articles on the topic and lead the scientific community research on LCA products and wood product systems. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** lists the countries with the highest number of publications, being that, among the 27 countries, the USA is the leading one, followed by Canada, Germany and Sweden.

FIGURE A 4: GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF STUDIES REGARDING THE NUMBER OF PUBLISHED PAPERS



SOURCE: the authors (2019).

TABLE A 3: NUMBER OF PUBLICATIONS BY COUNTRY

COUNTRY	Nº OF PUB.
USA	29
CANADA	7
GERMANY	6
SWEDEN	6
SLOVAKIA	5
ITALY	4
BRAZIL	3
FRANCE	3
NORWAY	3
MALAYSIA	3
U.K.	3

Keywords represent the main content of existing studies and portray topics that have been focused on a particular domain (JIN et al., 2019). **Erro! Fonte de referência não encontrada.** indicates the main keywords found in the selected literature represented in a word cloud where word sizes are proportional to their incidence among the publications.

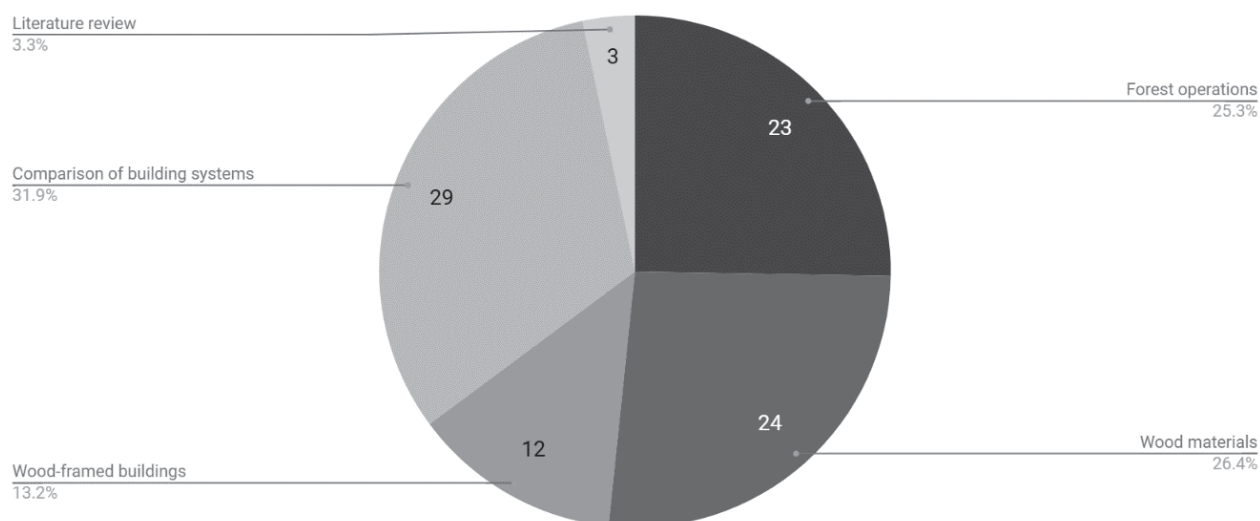
The high incidence of the keywords 'LCA', 'LCI', 'energy', 'emissions', 'carbon', 'buildings', 'wood products', demonstrates that the environmental assessment of the WF construction system and its wood materials is strongly related to the development of Life Cycle Inventories (LCIs), that these assessments seek to survey the energy consumption of production, use and operation; as well as to survey their production associated emissions whose most commonly assessed factor is carbon. Furthermore, the authors understand that occurrence of expressions such as 'footprint', 'climate', 'lumber', 'timber', 'buildings', 'life' and 'cycle' reiterate the connection between the development of LCA studies of wood materials with their application in construction, as well as the interest of studying the life cycle of these materials associated with their application in buildings.







FIGURE A 6: DISTRIBUTION OF ARTICLES BY THEMATIC AXES.



SOURCE: the authors (2019).

TABLE A 4: CLASSIFICATION OF THEMATIC AXES AND AUTHORS OF THE STUDIES RELATED TO THE SYSTEMATIC REVIEW.

Ranking (n, %)	Thematic axis	Study theme	References
1º (23, 5.6%)	Forest Operations	LCA or LCI of forestry operations for the production of roundwood.	Abbas and Handler (2018); Berg and Lindholm (2005); Cardellini et al. (2018); Ferro et al. (2018a); González-García et al. (2013a); González-García et al. (2013b); Handler et al. (2014); Johnson et al. (2005); Klein et al. (2015); Klvac et al. (2003); Lovarelli et al. (2018); May et al. (2013); Michelsen; Solli and Strømman (2008)Mirabella; Castellani and Sala (2014); Nakano et al. (2018); Oneil et al. (2010); Oneil and Puettmann (2017); Proto et al. (2017a); Proto et al. (2017b); Saud et al. (2013); Sonne (2006); Timmermann and Dibdiakova (2014); White; Gower and Ahl (2005).
2º (23, 25.6%)	Wood materials <sup>9</sup>	LCA or LCI of the production process of wood materials that are applied to the wood frame construction system and are scope of this review (e.g.: lumber/ sawnwood, plywood and OSB).	Benetto; Becker and Welfring (2009); Bergman; Kaestner and Taylor (2016); Bergman and Bowe (2008); Bergman and Bowe (2010); Bergman and Bowe (2012); Bolin and Smith (2011); Chen et al. (2018); Eshun; Potting and Leemans (2010); Ferro et al. (2018b); Kline (2005); Martínez-Alonso and Berdasco (2015); Milota; West and Hartley (2005); Milota and Puettmann (2017); Murphy, Devlin and McDonnell (2015); Pommier et al. (2016); Puettmann et al. (2010); Puettmann; Wagner and Johnson (2010); Puettmann and Wilson (2005); Ramasamy et al. (2015); Ratnasingam et al. (2015); Saud et al. (2015); Vilcekova et al. (2015); Wang et al. (2017); Wilson and Sakimoto (2005);

<sup>9</sup> The wood materials considered in this study are those commonly applied to the WF system in Brazil, according to the SiNAT 005 Guideline - sawnwood, OSB and plywood.

3° (29, 32.2%)	Comparison of building systems	LCA or LCI for the comparison of different building systems with the wood frame or other similar wood-based construction systems.	Balasbaneh and Marsono (2017); Buchanan; John and Love (2013); Crippa et al. (2018); Fu et al. (2014); Glover; White and Langrish (2002); Gong et al. (2012); Hafner and Schäfer (2017); Himpe et al. (2013); Iddon and Firth (2013); Kahhat et al. (2009); Kaziolas et al. (2017); Lewandowska et al. (2015); Li (2012); Lippke and Edmonds (2006); Lippke et al. (2004); Mackova et al. (2016); Maodus et al. (2016), Marceau and VanGeem (2006); McDevitt and Allison (2013); Meil et al. (2006); Minarovicová and Rabenseifer (2013); Mitterpach and Stefko (2016); Monahan and Powell (2011); Motuziene et al. (2016); Pajchrowski et al. (2014); Passer; Kreiner and Maydl (2012); Švajlenka and Kozlovská (2018); Tavares; Lacerda e Freire (2019); Winistorfer et al. (2005).
4° (12, 13.3%)	Wood Frame Buildings	LCA and LCI of the wood frame construction system or similar wood-based systems.	Achenbach, Wenker and Rüter (2018); Diyamandoglu and Fortuna (2015); Dadoo; Gustavsson e Sathre (2010); Dong; Kennedy and Pressnail (2005); Frenette et al. (2010); Fufa et al. (2018); González-García et al. (2012); Kildsgaard et al. (2013); Malone et al. (2014); Mitterpach; Ilečková and Štefko (2018); Padilla-Rivera, Amor and Blanchet (2018); Salazar and Meil (2009);
5° (3, 3.3%)	Literature review	Literature review involving LCA and wood products.	May, Guenther and Haller (2013); Meil et al. (2007); Oneil, Bergman and Puettmann (2017).

SOURCE: the authors (2019).

Regarding the types of study found - within the context of LCA - 68 articles were studies that presented complete LCA results (using primary and/ or secondary data), 20 were exclusively from LCI, and 3 were review articles.

### 3.1.4 DISCUSSION

The results of the systematic review were discussed in two sections, one regarding the descriptive analysis (section 4.1) and one regarding a thematic analysis (section 4.2). Section 4.3 presents a framework with an indication of the main scientific gaps and a suggestion of what could be explored on the mentioned thematic axes both locally (Brazil) and globally.

#### 3.1.4.1 Discussion of descriptive analysis

The concentration of publications in the last 5 years brings evidence of the current search for LCA data generation in order to report the environmental performance of products and systems, as well as the growing interest of the scientific

community in the environmental impacts assessment of wood materials and their application in the built environment. This fact may be related to increased development of Environmental Product Declarations (EPDs) mainly in Europe (MINKOV et al., 2015; IBÁÑEZ-FORÉS et al., 2016; GELOWITZ; MCARTHUR, 2018), as well as to the energy performance analysis of buildings for the purpose of project approval and certification (LEWANDOWSKA et al., 2015). Also, the interest in reporting the environmental performance of building systems and promoting the use of more sustainable solutions encourages the comparison of the available alternatives.

Journal of Cleaner Production and Wood and Fiber science featured as the main publishers in the scientific picture looked up, which is a reasonable result considering the scope of this study in relation to the scope and characteristic of the journals, one engaged in sustainability assessment and the other in forest products. Besides these two journals, there was a distribution of the articles reviewed among journals whose main objective is the diffusion of topics related to sustainability, as well as journals focusing on forest studies, indicating interest not only for the built environment, but also for the forest sector, thus highlighting the multidisciplinary of the theme.

The research areas involved, noted through the papers indicated in **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, encompasses the environmental analysis of forestry operations, timber components, WF buildings around the world, as well as the comparison of building systems including WF. This emphasizes the need for holistic thinking when studying the WF construction system, considering the integration of the various sectors involved in providing the necessary materials of the system, the appreciation of timber construction systems within the construction industry, in order to have the representative picture of the implications and the consequences the construction system can bring.

The LCA of the WF construction system can figure as an umbrella term, not only due to the variety of materials that can be applied to it, but also regarding the life cycle phases of the buildings covered by LCA studies, which may involve: pre-operational phase (extraction, processing and transportation of raw materials); operational phase (operational energy and maintenance); post-operational phase (waste management, final disposal or circularity of the materials used).

The geographic distribution observed through the analyzed publications indicates a centralization of research in European and North American countries - USA and Canada. The US is clearly a leading country in the number of publications involving LCA in the WF system context. This engagement may be related to the tradition of the country in building wood-framed houses (AWC and AF&PA, 2001; THALLON, 2008), and also to the creation of the Consortium for Research on Renewable Industrial Material - CORRIM<sup>10</sup>. This organization currently conducts and manages LCA surveys of timber products production, use and disposal in the USA, and its inventories follow strict guidelines to provide a database for assessing the potential environmental impacts and costs of wood building materials - involving the stages of planting, cultivation, manufacture, construction, use and demolition (CORRIM, 2018). Moreover, the increasing development of EPDs in European countries (MINKOV et al., 2015; IBÁÑEZ-FORÉS et al., 2016; GELOWITZ; MCARTHUR, 2018) may also be one of the factors that justify the high production of LCA studies in the continent. The USA and Canada have also published EPDs of timber products through a partnership between the American Wood Council and the Canadian Wood Council (AWC; CWC, 2019), further reflecting CORRIM's initiatives in the early 2000s.

It is noteworthy that the three leading countries in publications on the subject stand out for their timber productivity and also have the WF as one of the main construction systems, especially regarding residential buildings. However, even though Brazil is a country with large geographical area and which leads the wood productivity of pine and eucalyptus, the geographical distribution of studies also illustrate that the country does not present a significant development of LCA studies on the subject, being that only three publications were identified for Brazil in the proposed research picture. This pinpoints the opportunity for the development of LCA of timber products in the country, considering the representativeness of its forest production.

Regarding keywords indicated in the studies, the high incidence of terms 'LCA', 'LCI', 'energy', 'emissions', 'carbon', 'buildings', 'wood products' portrays the

---

<sup>10</sup> CORRIM is a non-profit organization incorporated in the US with the purpose of creating a consistent database in order to evaluate the environmental performance of wood and alternative materials from cradle-to-grave so that consistent comparisons can be made and characterized, a find out opportunities to for improving environmental performance (CORRIM, 2018).

relationship of timber materials and timber construction systems with sustainability and, consequently, the assessment of their environmental performance.

The descriptive analysis could bring a picture of how the development of studies involving LCA in the context of building systems and its materials is, especially regarding the WF construction system – the focus of this review. Through it, it was possible to note which are the reference journals and countries in the theme and its related areas, as well as how the subject has been developing over the years.

#### 3.1.4.2 Discussion of thematic analysis

Among the five grouped thematic axes, there is the predominance of studies involving LCA in the context of forestry operations and wood materials. Few studies picture LCA of WF buildings by themselves, which may be a consequence of the complexity of building LCA development due to the number of materials/ products involved, as well as the fact that they have a long useful life that is susceptible to change and which needs maintenance. Conversely, the thematic axis involving the comparison of construction systems presented a higher incidence of studies, possibly due to the concern of the construction industry regarding more sustainable construction approaches and systems, given the global contribution of the construction sector to the use of natural resources, energy as well as in relation to air emissions. It is important to point out, after all, that the studies regarding comparison of construction systems are usually conducted with secondary data, given the complexity of developing inventories for all materials. The literature review papers totaled 3 articles and although these were not the focus of the present study, they made important contributions in the context of the development of LCA for wood materials, generally bringing a comparison of the environmental profile of different timber products.

In the *Forest Operations* thematic axis, authors point out that the variability of silvicultural and management practices, rotation periods and machinery used depending on the species involved and the desired timber assortments can significantly affect the LCA results of forest operations and roundwood production (CARDELLINI et al., 2018). Even simpler issues such as the tree trunk size considered in the analysis, different transport distances in the forest and from the forest to the wood processing plant provide variations in the results (MICHELSEN et

al., 2008). In this sense, the reliability and robustness of the studies is improved as less general LCI data from forestry practices are used (CARDELLINI et al., 2018) and, consequently, average forestry operations data should be used with caution and avoided if possible (MICHELSEN et al., 2008). Despite the variability caused by the factors mentioned, it was possible to observe that several studies indicate harvesting as a hotspot in forest operations due to the use of fossil fuels by the machinery (FERRO et al., 2018; NAKANO et al., 2018), especially in regards to GHG emissions - the most prevalent analysis in the assessments. Although the carbon cycle is a relevant topic for this phase and, later, for the life cycle of forest products, it was noted that few studies, such as Timmermann and Dibdiakova (2014), take the losses of carbon stored in litter and soil during planting and harvesting stages into account in the analysis.

In relation to this thematic axis, it is understood that there are opportunities for research which foster the generation of primary LCA data for the various silvicultural and forest management practices in view of the variability caused by these issues. Despite the impossibility of collecting specific primary data for every LCA developed, there is a perception that doing so could add strength to assessments involving LCA data from forest practices - such as LCAs from wood materials - due to the reduction of uncertainties triggered by the use of average or generic data. In addition, it was possible to note that the environmental assessment of forest operations usually focuses on GHG emissions, being that the impacts of this phase on biodiversity, land use change and landscape changes would be opportunities for future studies.

In the *Wood Materials* thematic axis, it can be observed that the variability in the choice of system boundaries makes the comparability of similar products and systems difficult. An example is the inclusion (or not) of the forest operations phase in the analyzes, as some studies involve this phase (MILOTA and PUETTMANN, 2017; MURPHY, DEVLIN and MCDONNELL, 2015), while others include only the harvest phase (PUETTMANN et al., 2010). In this sense, Milota and Puettmann (2017) indicate that the contribution of forestry operations ranges from 0 to 2% of emissions for coniferous lumber production in the northwest and southeast of the US, or up to 67% for minor wood composites. In contrast, Murphy, Devlin and McDonnell (2015), analyzing the cradle-to-gate of energy inputs and GHG emissions in the production of varied wood materials, indicate that forestry operations and timber



transportation contribute significantly to emissions from lumber and raw wood production. Still in relation to the adoption of borders, some studies define gate-to-gate analysis, evaluating the production starting from logs storage in the yard to the final material benefited at the output factory gate (BERGMAN and BOWE, 2008; BERGMAN AND BOWE, 2010). Most studies do not consider end-of-life scenarios of materials such as reuse, recycling and disposal; and very few studies adopt a cradle-to-grave approach.

The variability of boundaries may have led to different conclusions regarding the hotspots of production processes. There are studies that place the transportation of wood with an important contribution to the evaluated impacts (BENETTO et al., 2009), and others that indicate that forest harvesting and raw material transportation contribute less to impacts in relation to operations that require heat generation (PUETTMANN AND WILSON, 2005), or even those that place the drying process as the main hotspot with opportunities for improvement (ESHUN et al., 2010).

Regarding factors that interfere with results, it is observed that the energy matrix considered in the studies is generally responsible for the potential variability caused by regionality factors. An example is the study by Wilson and Sakimoto (2005) who evaluated plywood production in different regions, discussing the effects of a hydropower-dependent process and one dependent on coal, oil and uranium fuels for electricity production. In the study developed by Bergman and Bowe (2010), the region selected for production affects the environmental impact of the material manufacturing, since coal is the most used material for electricity generation in the study region. Factors such as the wood genera - coniferous or hardwood - is another variant in the evaluation of a lumber production process, as some authors report that coniferous lumber generally requires less electrical and thermal energy in its processing compared to hardwood lumber (BERGAMAN AND BOWE, 2008; BERGAMAN AND BOWE, 2010; BERGAMAN AND BOWE, 2012).

Regarding the impact categories assessed, most studies address embodied energy (EE) and GHG emissions, and a minority discuss the efficiency of using wood resources for timber production, as Eshun et al. (2010). Also, few studies, such as Bolin and Smith (2011), involve wood preservative treatment data in inventories and, in this sense, it is noted that there is room for proposition and investigation of new adhesives, such as in the studies Benetto et al. (2009) and Ferro et al. (2018b), since the use of synthetic resins in the panel production process has a significant



contribution to energy expenditure and GHG emissions (BENETTO et al., 2009; FERRO et al., 2018b; MURPHY, DEVLIN and MCDONNELL, 2015; PUETTMANN AND WILSON, 2005).

From the pointed-out factors, it is noted that among the research opportunities are the investigation of preservatives, resins and adhesives employed in the production of wood materials, aiming at proposing less polluting, toxic and environmentally harmful alternatives. In the sense of the use of different energy resources, we also highlight the consideration of the variability of energy matrices for processes evaluated in different geographic coverage, reinforcing the need to develop regional databases for product systems. Likewise, the analysis of the substitution of energy resources in the processes for impact reduction, according to the type of emission released into the atmosphere (fossil and non-fossil) is an opportunity. Finally, in relation to the selected study boundaries, we highlight the approach of forest operations and the end-of-life phase, which are important factors regarding the wood material life cycle thinking and its circularity potential.

Regarding the *Wood Framed Buildings* thematic axis, it is important to note that buildings are complex as they involve the use of many materials, are susceptible to change and require maintenance, which often makes the development of LCAs more complex and requires the use of average or even estimated data.

Most of the research raised in this study adopt a cradle-to-gate boundary (ACHENBACH, WENKER AND RÜTER, 2018; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2012; MALONE et al., 2014; SALAZAR AND MEIL, 2009) and few studies, such as Diyamandogiu and Fortuna (2015) and Padilla-Rivera, Amor and Blanchet (2018), address the end-of-life of the materials that compose buildings; as well as few studies take into consideration the operational phase of the building, as in Kildsgaard et al. (2013).

The study by Achenbach, Wenker and Rüter (2018) evaluated the stage of industrial assembly and construction of prefabricated wooden houses, pointing out that in the prefabrication of the building elements, the transportation and construction site activities may be responsible for a significant contribution of approximately 30% to the Global Warming Potential (GWP) and Acidification Potential (AP) impacts. Regarding the inclusion (or not) of the construction stage in LCAs, even knowing that it can be complex and variable, it is understood that not including this stage in the evaluation fails to explore important characteristics of industrialized systems, such as

the WF, as data such as waste generation, manpower and energy demand are not analyzed for this stage and could be important data for decision making when compared to non-industrialized systems.

The consideration of energy consumption in the operational phase of the building is present among the studies analyzed, however, only a few studies that address the whole life cycle of the building. While some studies exclusively analyze the operational phase of the building (KILDGAARD et al. 2013), others do cradle-to-gate analysis, in order to identify the main environmental factors throughout the wood-framed wall life cycle from by the wall production inventory analysis. The study by González-García et al. (2012), for example, identifies the assembly, transportation and electricity generation phase as the main environmental impact generators in wood-frame wall production. The study by Frenette et al. (2010) presents a comparison of building solutions for cradle-to-gate WF wall assemblies and points to a relatively small contribution of wood-based products to total impacts. In both cases, the analysis of the building operating energy, and hence the performance of the wall composition, would also be of interest for the comparison of material sets, being this a point to be further explored.

Some studies include forestry operations in the assessment of wood materials manufacturing. On example is the study by Malone et al. (2014) which, beside forest operations accounting in the wood material production, include metal fasteners and wall insulation in the assessment of the WF structural system, conducting a cradle-to-gate analysis for five impact categories: total energy consumption; use of fossil fuels; global warming potential; use of wood fibers; wood waste - from raw material extraction to construction. In addition, the study by Salazar and Meil (2009) assesses the cradle-to-gate production of WF wall systems as well as their end-of-life phase – including the harvesting phase in forest operations, and not addressing, however, the building operational phase.

The study by Diyamandoglu and Fortuna (2015) was one of the few studies which focused on the end of life phase of the WF wall component materials, being that it is possible to consider this a gap to be explored in the WF wall assembly life-cycle. The authors checked the best end-of-life scenarios in terms of GHG reduction and energy resource use in order to seek for more sustainable solutions in the context of circular economy. The consideration of end-of-life scenarios, is extremely important for stimulating a transition from a linear thinking system to a circular one,

and also for discussing the future applications of materials - considering their reuse, recycling or correct final disposal – which, in the case of wood, brings about a concern with the application of preservative treatments in some countries. It is possible to notice, however, that it is not usually addressed primarily due to the complexity in determining what will be done with the materials after the building's useful life. Thus, the investigation of hotspots and advantages of various building solutions that involve the application of different materials that perform the same role in WF buildings, considering the entire life cycle both of materials and of the building itself, is an opportunity for more complete studies, even though they require intense data collection and availability.

The *Comparison of Building Systems* thematic axis presented a wide variety of research gaps due to the complexity of buildings and the various opportunities for applying LCA in this context. Regarding the data sources used in LCA studies, it was possible to find various studies aided by software and databases (BALASBANEH AND MARSONO, 2017; CRIPPA et al., 2018; GONG et al., 2012; MARCEAU AND VANGEEM, 2006; MEIL et al., 2006; MITTERPACH AND STEFKO, 2016), with the help of literature data (BUCHANAN, JOHN AND LOVE, 2013; FU et al., 2014; IDDON AND FIRTH, 2013; BALASBANEH AND MARSONO, 2017), and also with data estimated from EPDs (HAFNER AND SCHÄFER, 2017). It is worth emphasizing the greater robustness of building system evaluations due to the application of primary and local data to the elements involved in the process and, consequently, focused on the technological reality and practices adopted at the considered geographical boundary. By doing so, it is possible to reduce the uncertainties in the LCA of buildings and find the hotspots of their production chains, either at the level of materials used in their pre-operational phase, or at other points of their lifecycle. Hence, the development of product-specific LCIs contributes to filling this last-mentioned scientific gap, and can be achieved by developing EPDs as these documents are dependent on official LCA data. With the increased availability of EPDs, the environmental assessment of more complex processes and products involving various materials - such as buildings - can be made possible.

Another factor that supports the need for primary data generation is the influence of the energy mix on the environmental impacts of product systems - a relevant factor in the consumption of energy resources and the type and intensity of impacts associated with them. In the case of buildings, the energy mix reflects the

emissions associated to not only to material production, but also to the building operational phase. Factors like these run the risk of being neglected when using secondary data in environmental analysis.

Regarding the boundaries adopted, many of the studies of this last thematic axis address only the pre-operational phase of buildings (BALASBANEH AND MARSONO, 2017; CRIPPA et al., 2018; FU et al., 2014; LI, 2012; TAVARES, LACERDA AND FREIRE., 2019; LIPPKE AND EDMONDS, 2006), whereas some publications evaluate only the operational performance of buildings (MARCEAU AND VANGEEM, 2006); or pre-operational and operational phases together (IDDON AND FIRTH, 2013; LIPPKE et al., 2004; MEIL et al., 2006); or even the entire building life cycle (GONG et al., 2012; PAJCHROWSKI et al., 2014). Still, there are those studies like Buchanan, John and Love (2013) which do not analyze the construction and demolition phase, and even though presents two end-of-life scenarios. There are also those who make two separate analyzes, as in Li (2012) - whose study was cradle-to-gate and cradle-to-grave, or as Hafner and Schäfer (2017)- who analyze the pre-operational phase and the end-of-life. Thus, it can be observed that the choice of boundaries is not homogeneous in building LCA, precisely because of the complexity during the useful life of buildings. The two main building stages addressed are the pre-operational and the operational stages.

Assessments that consider the materials embodied energy within the building's energy assessment need to be more widespread, especially as buildings become more efficient and cleaner energies are used in their operation (HIMPE et al., 2013; VILCEKOVA et al., 2015). Consequently, the inclusion of energy applied in the production of materials in the energy assessment of buildings becomes increasingly important. Although some studies make analyzes for the end-of-life stage (BALASBANEH AND MARSONO, 2017; BUCHANAN, JOHN AND LOVE, 2013; HAFNER AND SCHÄFER, 2017; LI, 2012), among the studies included in this review, this phase is rarely addressed. Thus, it is also important to emphasize the need to relate the pre-operational phase with the operational and end-of-life phase of the construction systems and materials, since the consideration of scenarios of final destination and potential material and recycling is important.

Most studies in this review which conduct the comparison of construction systems address embodied energy (EE) and embodied CO<sub>2</sub>. Some studies have reported prefabricated wooden building solutions with environmental advantages in

terms of energy consumption (BALASBANEH AND MARSONO, 2017; GONG et al., 2012; LIPPKE AND EDMONDS, 2006; ŠVAJLENKA AND KOZLOVSKÁ, 2018) and GHG emissions (BALASBANEH AND MARSONO, 2017; BUCHANAN, JOHN AND LOVE, 2013; HAFNER AND SCHÄFER, 2017; MITTERPACH AND STEFKO, 2016; ŠVAJLENKA AND KOZLOVSKÁ, 2018), while others discuss some environmental advantages of using wood, not only in the construction phase, but also in the post-use phase (recovery) of the materials (LI, 2012).

Studies that evaluated the complete life cycle of buildings, such as Gong et al. (2012), indicate that WF buildings are 30% more efficient, in regards to embodied energy, in comparison to steel and concrete frame designs, and further point out that over the life cycle, the energy consumption of the concrete system is almost the same of the steel frame system. Fu et al. (2014) state that the WF walls present lower embodied carbon emissions in relation to masonry. Benefits of using wood are shown through various stages of the building's life cycle such as: transportation (lighter material), shorter construction time due to prefabrication, less water and electricity use, less waste generation, less energy consumption for demolition/disassembly (PAJCHROWSKI et al., 2014).

The embodied energy and CO<sub>2</sub> emissions associated with the complementary structure and envelope materials are opportunities to reduce the environmental load (LIPPKE AND EDMONDS, 2006), so the investigation of hotspots and advantages of the different constructive solutions of the system is a potential gap to be explored, moreover also, it can effect both the operational and post-operational environmental loads.

The study by Hafner and Schäfer (2017) draws attention to the complementary materials that are used together with wood components in WF building solutions, exemplifying that multi-storey multi-family buildings often have stricter fire protection and sound insulation requirements and, consequently, the environmental advantages for timber buildings are balanced by the use of other materials necessary to meet these requirements. An example would be plaster, a high contributor to embodied carbon in the building, but which is generally a requirement for wood solutions to provide the fire protection needed by buildings (IDDON AND FIRTH, 2013). Another factor is that the reduction in operational carbon may lead to an increase in embodied carbon (IDDON AND FIRTH, 2013), as some

thermal insulating materials may be heavily dependent on fossil fuels in their production.

The study by Buchanan; John and Love (2013); discusses end-of-life options for wood, indicating the disadvantages of being sent to landfill due to anaerobic decay and methane emissions, and that burning wood for power generation could be a better option. In this context, scenarios for the final destination of wood, considering the issues regarding the application of resins, adhesives and preservative treatment, present excellent opportunities for research development. In Brazil, for example, the Resolution 307 of the National Environment Council (CONAMA) - which establishes guidelines for construction waste management - does not differ from natural wood waste from treated wood (CONAMA, 2002), and hence, the end-of-life of the treated wood materials applied to the WF system can be considered a concern to be dealt with, opening room for the study of reuse, recycling or disposal of these elements, or even the development of natural non-toxic preservative treatments.

Few studies include the construction stage in the analysis. In cradle-to-site analysis of prefabricated houses Tavares, Lacerda and Freire (2019) point out that material production is the major contributor in terms of embodied energy (64 to 90%) and GHG emissions (59 to 87%). In the same study, the production of materials represents about 80% of the total impacts, with the module production phase being the second most important, however, emphasizes that this varies according to the level of industrialization of prefab companies. The study by Lovarelli et al. (2018) reinforces this fact, pointing out that most of the energy associated with construction was used in the extraction of raw materials and processing of building materials. The study by Tavares, Lacerda and Freire (2019) further points out that transport impacts (of modules, workers and finishes) can vary significantly and are critical as they can balance the potential benefits of prefabrication.

The choice of functional unit for building LCA is important. Tavares, Lacerda and Freire (2019) draw attention to the fact that incorporated impacts increase with house size (number of rooms and inhabitants); however, a larger house leads to lower impacts per inhabitant, but similar impacts per m<sup>2</sup> (gross area) as the number of inhabitants increases more than the area. Therefore, careful choice of the functional unit, as well as the sensitivity analysis of the results in relation to this factor is important.

Regarding studies within the thematic axis developed in Brazil, there was only one study comparing the WF with 3 other construction systems by Crippa et al. (2018). The study focuses on the application of the BIM-LCA method through Archicad and Simapro software and not on the impact results generated. The environmental analysis of this study was developed for the four systems - ceramic brick masonry, concrete block masonry and steel frame walls - using the IPCC 2007 LCIA method, as well as the economic analysis of the options. The WF system has shown to be the most sustainable option for among the options as well as the most economically viable option for the country.

### 3.1.4.3 Major scientific gaps

This systematic review turned possible the identification of the research topics already explored, those being explored, as well that those that have not yet been explored in the research profile proposed. It was possible to notice the main regions that develop studies on the subject of this research, which aspects are usually addressed, and all these identified points contribute to the development of future research. The reading and analysis of the papers included in the review allowed the identification of the main research gaps to be filled both locally and globally, and are shown in **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

TABLE A 5: OBSERVED RESEARCH GAPS.

Research area	Thematic axis	Main research gaps
LCA/ LCI of forest operations	Forest Operations	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Primary LCI/ LCA data generation and application in the development of local studies;</li> <li>2. Generation of specific LCI data for different forest management practices</li> <li>3. Consideration of impacts regarding land use change, biodiversity and landscape.</li> </ol>
LCA/ LCI of the wood materials applied to the WF construction system <sup>11</sup>	Wood materials	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Primary LCI/ LCA data generation and application in the development of local studies;</li> <li>2. Consideration of LCI/ LCA data of forest operations in the analysis of wood materials production;</li> <li>3. LCI/ LCA data generation for wood preservation</li> </ol>

<sup>11</sup>The wood materials considered in this study are those commonly applied to the WF system in Brazil, according to the SiNAT 005 Guideline - sawnwood, OSB and plywood.



		and treatment processes; 4. Consideration and investigation of less polluting resins, adhesives and preservative treatments while applying the LCA tool in analyzing wood materials environmental profile; 5. Investigation of energy resources substitution in the processes.
LCA/ LCI of WF buildings or similar systems	Comparison of building systems	6. Primary LCI/ LCA data generation and application in the development of local studies; 7. Inclusion of the construction site activities in the analysis; 8. Consideration of the operational phase energy consumption in relation to the adopted system composition; 9. Consideration and discussion of the end-of-life of the treated wood materials applied to the system;
LCA/LCI applied to the comparison of building systems including the WF system for analysis	Wood Frame Buildings	10. Primary LCI/ LCA data generation and application in the development of local studies; 11. Consideration and discussion of the end-of-life phase of the materials involved – including reuse, recycling, energy recuperation and disposal scenarios; 12. Evaluation of the influence of local energy mix in case of secondary data use; 13. Inclusion of the materials embodied energy in the building energy assessment;

SOURCE: the authors (2019).

It is possible to note that the thematic axes have common research gaps to be observed. An example is the need for the generation and use of primary and local LCI/ LCA data for the elements involved in the WF supply chain, thus reducing the uncertainties of regionality and technology in the studies, mainly due to the lack of regional databases - a common factor among several countries, including Brazil. The lack of local data for the Brazilian reality, for example, limits the evaluation of a complete building, either in WF or other building systems, leading to the use of databases that, although providing robust data, possibly do not portray the technological reality of the country.

Another thing to mention is the predominance of cradle-to-gate LCAs, resulting in little research addressing the end-of-life of products, their reuse, recycling or disposal. Also, most wood product LCIs/ LCAs consider the wood extraction or the transportation of roundwood to the factory as system cradle. There are also those which adopt a factory gate-to-gate boundary to assess the material production. Hence, it was also possible to note that the forest operations stage and its

participation in the environmental loads of the products are considered in very few cases within the scope of the LCA studies.

### 3.1.5 FINAL CONSIDERATIONS

In this study, a qualitative and descriptive systematic literature review was performed using the Systematic Search Flow (SSF) method proposed by Ferenhof and Fernandes (2016). We analyzed 91 articles that provided a broad overview of the most recent research (2002-2019) involving the LCA of WF buildings and LCA of the production processes of wood materials applied to the WF system.

The research provided the identification of important scientific gaps through the studies raised, thus tracing the world scenario of LCA research of the WF construction system and the timber products involved. A recurring gap in all thematic axes was the need to generate primary data for more complete inventories with lower uncertainty, especially in aspects such as regionality and process technology. This is due to the lack of regional databases, a factor still common among several countries, especially in Brazil. It could also be noticed that there was a predominance of cradle-to-gate type LCAs, with few studies contemplating the complete life cycle of products, considering the end-of-life scenarios, for example. The development of studies that address the scientific gaps found is important for the assessment of the environmental profile of buildings, for the diffusion or application increase of more sustainable building systems, as well as to identify points of environmental improvement in these – being this one of the applications of the LCA tool.

In the *Forest Operations* thematic axis, it was observed that environmental assessments were concentrated around GHG emissions and few studies address the impacts on biodiversity, land use and landscape changes resulting from the activities of this axis. In the *Wood Materials* thematic axis, there is a vast field of research to be explored regarding the assessment of adhesives, resins and preservatives used to manufacture various wood products, as well as their relationship to the end-of-life of the materials. In the *Wood Framed building* thematic axis, it was possible to note the need for LCA studies that address the pre-operational phase together with the operational phase ie: that take into consideration the energy consumption, emissions and waste arising from the building use and maintenance versus the embodied energy and emission associated to its applied materials. Still, few studies involving

the complete life cycle of the buildings were observed, that is, that dealt with the final destination of the materials after the end of building useful life. Finally, in the *Comparison of Construction Systems* thematic axis, a wide variety of research gaps were noticed, since there are numerous opportunities for application of LCA. Due to the complexity presented by the different building material compositions, much research has been based on secondary data demonstrating the need to create and expand primary and regional databases for more robust building system assessments. Also, the environmental assessment of the construction stage and the end of the life cycle of the materials that make up the buildings were very little addressed in the studies raised as well.

Considering the carried-out systematic research, it should be noted that one of its limitations was the choice of the wood materials included in it, because, even though sawnwood/ timber/ lumber, oriented strand board and plywood are typical materials applied to timber construction systems, there is a variety of other options – mainly engineered wood products, which are currently applied to this type of construction system worldwide. However, in order to be more objective in the research method, and to accomplish the main purposes of conducting this research - gathering directions for future studies in the theme, especially for the Brazilian context due to the consolidation process of the WF system and the incipient LCA development in the country - the authors believe that defined strategy could bring good contributions. Hence, further research could be developed in order to specifically analyze the constructive solutions and materials variations of wood-framed construction systems and the LCA relation with them.

Considering the context of the research theme, it is important to point out that Brazil has great potential for the development of timber construction systems considering the recognized high productivity of its forest-based industry. Hence, generation of reliable scientific information in the theme – as through LCA - plays an important role in this process, since it may help the WF construction system consolidation in the country, in addition to finding opportunities for its performance and environmental improvement. However, as it could be noted, the development of LCA study in the country from primary data is still embryonic, given that the review presented very few LCA studies or LCI data in the theme. Hence, in order to turn possible more accurate building and sector assessment, the pointed research opportunities should be taken and encouraged.

Finally, it is possible to conclude that the theme presents many opportunities for scientific development worldwide, with space for application of LCA both for evaluation of the environmental performance of the construction system and the materials involved, and as a management tool to promote improvements in its production chain. In addition, it should be emphasized that the development of LCA studies within this research picture contributes to the information generation about the building system and can enable informed choice of more sustainable building practices.

### Acknowledgments

The authors thank the Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for financial support.

### REFERENCES

- ABBAS D, HANDLER RM (2018) Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. **J. Clean. Prod.** 176: 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.238>
- ACHENBACH H, WENKER JL, RÜTER S (2018) Life cycle assessment of product- and construction stage of prefabricated timber houses: a sector representative approach for Germany according to EN 15804, EN 15978 and EN 16485. **Eur. J. Wood and Wood Prod.** 76(2), 711–729. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1236-1>
- American Wood Council (AWC) and Canadian Wood Council (CWC). Environmental Product Declarations (EPDs) for Wood. <https://awc.org/sustainability/epd>. Accessed on: May 18 2019.
- ARAUJO VA, CORTEZ-BARBOSA J, GARCIA JN, GAVA M, LAROCA C, CÉSAR SF (2016) Woodframe: light framing houses for developing countries. **Revista de la construcción**, 15(2), 78–87. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2016000200008>
- ASDRUBALI F, FERRACUTI B, LOMBARDI L, GUATTARI C, EVANGELITI L, GRAZIESCHI G (2017) A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. **Build. and Environ.**, v. 114, p.307–332, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>

AWC - American Wood Council; American Forest & Paper Association (AF&PA) (EUA). **Details for Conventional Wood Frame Construction**. Washington. AWC. 2001. 52 p.

AWC – American Wood Council. WFCM - **Wood Frame Construction Manual for One- and Two-Family Dwellings**. 2015 Edition. 2014. Available on: <https://awc.org/codes-standards/publications/wfcm-2015>. 2014.

BALASBANEH AT, MARSONO AKB (2017) Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions. **Build. and Environ.**, v. 124, p. 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.025>

BENETTO E, BECKER M, WELFRING J (2009) Life Cycle Assessment of Oriented Strand Boards (OSB): from Process Innovation to Ecodesign. **Environ. Science & Technol.**, v. 43, p. 6003–6009. <https://doi.org/10.1021/es900707u>

BERGMAN RD, BOWE SA (2008) Environmental impact of producing hardwood lumber using life-cycle inventory. **Wood and Fiber Science**, v. 40, n. 3, p. 448–458.

BERGMAN RD, BOWE SA (2010) Environmental impact of manufacturing softwood lumber in northeastern and north central United States. **Wood and Fiber Science**, v. 42, p. 67–78.

BERGMAN RD, BOWE SA (2012) Life-cycle inventory of manufacturing hardwood lumber in southeastern US. **Wood and Fiber Science**, v. 44, n. 1, p. 71–84.

BERGMAN RD, KAESTNER D, TAYLOR AM (2016) Life Cycle Impacts of North American Wood. **Wood and Fiber Science**, v. 48, p. 40–53.

BERGMAN R, PUETTMANN M, TAYLOR A, SKOG KE (2014) The carbon impacts of wood products. **For. Prod. J.** v. 64, n. 7, p.320-332.

BOLIN CA, SMITH ST (2011) Life cycle assessment of borate-treated lumber with comparison to galvanized steel framing. **J. Clean. Prod.**, v. 19, n. 6–7, p. 630–639.

BUCHANAN A, JOHN S, LOVE S (2013) Life cycle assessment and carbon footprint of multistorey timber buildings compared with steel and concrete buildings. **N. Z. J. of For.** v. 57, n. 4, p. 9–18.

BUCHANAN AH, LEVINE SB (1999) Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. **Environ. Science and Policy**, n. 2, p. 427-437.

CARDELLINI G, VALADA T, CORNILLIER C, et al (2018) EFO-LCI: A New Life Cycle Inventory Database of Forestry Operations in Europe. **Environ. Manag.**, v. 61, n. 6, p. 1031–1047.

CHEN J, TER-MIKAELIAN MT, YANG H, COLOMBO SJ (2018) Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada. **Forestry**, v. 91, n. 2, p. 193–205.

CONAMA. **Resolução N° 307. 2002.** Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasília. p 95.

CORRIM - Consortium for Research on Renewable Industrial Materials. Available on: <<https://corrim.org/history/>>. Accessed on: May 18, 2019.

CRIPPA J, BOEING LC, CAPARELLI APA, COSTA MRMM, SCHEER S, ARAUJO AMF, BEM D (2018) A BIM-LCA integration technique to embodied carbon estimation applied on wall systems in Brazil. *Built Environ. Proj. Asset Manag.*, v. 8, n. 5, SI, p. 491–503.

DIYAMANDOGLU V, FORTUNA LM (2015) Deconstruction of wood-framed houses: Material recovery and environmental impact. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 100, p. 21–30, 2015.

DODOO A, GUSTAVSSON L, SATHRE R (2010) Life cycle primary energy implication of retrofitting a wood-framed apartment building to passive house standard. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1152–1160.

DONG B, KENNEDY C, PRESSNAIL K (2005) Comparing life cycle implications of building retrofit and replacement options. **Canadian J. of Civ. Eng.**, v. 32, n. 6, p. 1051–1063.

EDWARDS B (2008) **Guía básica de la sostenibilidad**. Barcelona: Gustavo Gili.

ENGLAND JR, MAY B, RAISON RJ, PAUL KI (2013) Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests: Carbon sequestration and greenhouse gas emissions. **For. Ecology and Manag.**, v. 302, p. 295–307, 2013.

ESHUN JF, POTTING J, LEEMANS R (2010) Inventory analysis of the timber industry in Ghana. *Intern. J. Life Cycle Assess.*, v. 15, n. 7, p. 715–725.

ESPÍNDOLA LR (2017) **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. Doctoral Thesis. Universidade de São Paulo, São Carlos.

ILCD. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System Handbook** – General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010



FERENHOF HA, FERNANDES RF (2016) **Passos para construção da Revisão Sistemática e Bibliometria.** Available at: <[http://www.igci.com.br/artigos/passos\\_rsb.pdf](http://www.igci.com.br/artigos/passos_rsb.pdf)>. Accessed on: January 2 2019.

FERRO FS, SILVA DAL, ICIMOTO FH, LAHR FAR, GONZÁLEZ-GARCÍA S (2018) Environmental Life Cycle Assessment of industrial pine roundwood production in Brazilian forests. **Science of the Total Environ.**, v. 640–641, p. 599–608.

FERRO FS, SILVA DAL, ROCCO LAHR FA, ARGENTON M, GONZÁLEZ-GARCÍA S (2018) Environmental aspects of oriented strand boards production. A Brazilian case study. **J. Clean. Prod.**, v. 183, p. 710–719, 2018b.

FRENETTE CD, BULLE C, BEAUREGARD R, SALENIKOVICH A, DEROME D (2010) Using life cycle assessment to derive an environmental index for light-frame wood wall assemblies. **Build. and Environ.**

FU F, LUO H, ZHONG H, HILL A (2014) Development of a carbon emission calculations system for optimizing building plan based on the LCA framework. **Math. Problems in Eng.**

FUFA SM, SKAAR C, GRADECI K, LABONNOTE N (2018) Assessment of greenhouse gas emissions of ventilated timber wall constructions based on parametric LCA. **J. Clean. Prod.** v. 197, p. 34–46.

GELOWITZ MDC, MCARTHUR JJ (2018) Insights on environmental product declaration use from Canada's first LEED® v4 platinum commercial project. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 436–444.

GLOVER J, WHITE DO, LANGRISH TAG (2002) Wood versus concrete and steel in house construction. **J. of For.** v. 100, n. 8, p. 34–41.

GONG X, NIE Z, WANG Z, CUI S, GAO F, ZUO T (2012) Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing: A comparative study. **J. of Ind. Ecology**, v. 16, n. 4, p. 576–587.

GONZÁLEZ-GARCÍA S, BONNESOEUR V, PIZZI A, FEIJOO G, MOREIRA MT (2013a) The influence of forest management systems on the environmental impacts for Douglas-fir production in France. **Science of the Total Environ.**, v. 461–462, p. 681–692.

GONZÁLEZ-GARCÍA S, KROWAS I, BECKER G, FEIJOO G, MOREIRA MT (2013b) Cradle-to-gate life cycle inventory and environmental performance of Douglas-fir roundwood production in Germany. **J. of Clean. Prod.**, v. 54, p. 244–252.



GONZÁLEZ-GARCÍA S, LOZANOL RG, ESTÉVEZ JC, PASCUAL RC, MOREIRA MT, GABARRELL X, PONS JR, FEIJOO G (2012) Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. *Intern. J. Life Cycle Assess.* v. 17, n. 4, p. 432–443.

HAFNER A, RUETER S (2018) Method for Assessing the National Implications of Environmental Impacts from Timber Buildings - An Exemplary Study for Residential Buildings in Germany. *Wood and Fiber Science*, v. 50, p.139-154.

HAFNER A, SCHÄFER S (2017) Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. *J. of Clean. Prod.* v. 167, p. 630–642.

HANDLER RM, SHONNARD DR, LAUTALA P, ABBAS D, SRIVASTAVA A (2014) Environmental impacts of roundwood supply chain options in Michigan: Life-cycle assessment of harvest and transport stages. *J. of Clean. Prod.* v. 76, p. 64–73.

HIMPE E, TRAPPERS L, DEBACKER W, et al. (2013) Life cycle energy analysis of a zero-energy house. *Build. Res. and Inf.* v. 41, n. 4, p. 435–449.

IBÁÑEZ-FORÉS V, PACHECO-BLANCO B, CAPUZ-RIZO SF, BOVEA MD (2016) Environmental Product Declarations: Exploring their evolution and the factors affecting their demand in Europe. *J. of Clean. Prod.* v. 116, p. 157-169.

IDDON CR, FIRTH SK (2013) Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK. *Energy & Build.*, v. 67, p. 479–488.

IEA - International Energy Agency (2013) **Transition to sustainable buildings**. Paris.

**ISO 14040**, 2006a. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. International Organization for Standardization. Geneva.

**ISO 14044**, 2006b. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.

JIN R, YUAN H, CHEN Q (2019) Science mapping approach to assisting the review of construction and demolition waste management research published between 2009 and 2018. *Resources, Conservation And Recycling*, v. 140, p.175-188.

JOHNSON LR, LIPPKE B, MARSHALL JD, COMNICK J Life-cycle impacts of forest resource activities in the Pacific Northwest and Southeast United States. *Wood and Fiber Science*, v. 37, n. SI, p. 30–46, 2005. USA: SOC WOOD SCI TECHNOL.

KAHHAT R, CRITTENDEN J, SHARIF F, FONSECA E, LI K, SAWHNEY A, ZHANG P (2009) Environmental Impacts over the Life Cycle of Residential Buildings Using Different Exterior Wall Systems. **J. of Infrastruct. Systems**, v. 15, n. 3, p. 211–221.

KAZIOLAS DN, ZYGOMALAS I, STAVROULAKIS GE, BANIOPOULOS CC (2017) LCA of timber and steel buildings with fuzzy variables uncertainty quantification. **Eur. J. of Environ. and Civ. Eng.**, v. 21, n. 9, p. 1128–1150.

KILDGAARD I, JARNEHAMMAR A, WIDHEDEN A, WALL M (2013) Energy and Environmental Performance of Multi-Story Apartment Buildings Built in Timber Construction Using Passive House Principles. **Build.** v. 3, n. 1, p. 258–277.

KLEIN D, WOLF C, SCHULZ C, WEBER-BLASCHKE G (2015) 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *Intern. J. Life Cycle Assess.* v. 20, n. 4, p. 556–575.

KLINE DE (2005) Gate-to-gate life-cycle inventory of oriented strandboard production. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 74–84.

KLVAC R, WARD S, OWENDE PMO, LYONS J (2003) Energy audit of wood harvesting systems. **Scandinavian J. of For. Res.** v. 18, n. 2, p. 176–183.

LEWANDOWSKA A, NOSKOWIAK A, PAJCHROWSKI G, ZAREBSKA J (2015) Between full LCA and energy certification methodology--a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment. **Intern. J. Life Cycle Assess.** v. 20, n. 1, p. 9–22.

LI SH (2012) Embodied Environmental Burdens of Wood Structure in Taiwan Compared with Reinforced Concrete and Steel Structures with Various Recovery Rates. **Appl. Mechanics and Mater.** v. 174–177, p. 202.

**Lifecycle Initiative** (2019) Our Mission, Vision and Impact. Available on: <<https://www.lifecycleinitiative.org/>>.

LIPPKE B, EDMONDS L (2006) Environmental performance improvement in residential construction: The impact of products, biofuels, and processes. **For. Prod. J.**, v. 56, n. 10, p. 58–63.

LIPPKE B, WILSON J, PEREZ-GARCIA J, BOWYER J, MEIL J (2004) CORRIM: Life-Cycle Environmental Performance of Renewable Building Material. **For. Prod. J.** v. 54, n. 6, p. 8–19.

LOVARELLI D, FUSI A, PRETOLANI R, BACENETTI J (2018) Delving the environmental impact of roundwood production from poplar plantations. **Science of The Total Environ.** v. 645, p. 646–654.

MACKOVA D, SPISAKOVA M, KOZLOVSKA M, SVAJLENKA J (2016) Environmental Assessment of Buildings Constructed by Modern Methods of Construction. **Appl. Mechanics and Mater.** v. 861, p.601-608.

MAY N, GUENTHER E, HALLER P (2017) Environmental Indicators for the Evaluation of Wood Products in Consideration of Site-Dependent Aspects: A Review and Integrated Approach. **Sustainability**, v. 9, n. 10.

MALONE BP, GUPTA R, MILLER TH, PUETTMANN ME (2014) Environmental impact assessment of light-frame and timber frame structures. **J. of Green build.** v. 9, n. 2, p. 102–123.

MAODUS N, AGARSKI B, KOETOV MIULI T, BUDAK I, RADEKA M (2016) Life cycle and energy performance assessment of three wall types in south-eastern Europe region. **Energy and Build.**, v. 133, p.605-614.

MARKO R. **Estudo da Abrainc/FGV projeta demanda habitacional até 2027.** Available on: <<https://sindusconsp.com.br/estudo-da-abrainc-fgv-projeta-demanda-habitacional-ate-2027/>>. Accessed on: Feb 14, 2019.

MARCEAU ML, VANGEEM MG (2006) Comparison of the life cycle assessments of an insulating concrete form house and a wood frame house. **J. of ASTM Intern.** v. 3, n. 9.

MARTÍNEZ-ALONSO C, BERDASCO L (2015) Carbon footprint of sawn timber products of *Castanea sativa* Mill. in the north of Spain. **J. of Clean. Prod.**, v. 102, p. 127–135.

MEIL J, WILSON J, O'CONNOR J, DANGERFIELD J (2007) An assessment of wood product processing technology advancements between the CORRIM I and II studies. **For. Prod. J.** v. 57 (7/8) pp: 83-89.

MCDEVITT JE, ALLISON RW (2013) Environmental life cycle assessment of analogous New Zealand “exemplar house” designs. **J. of Green Build.** v. 8, n. 4, p. 127–145.

MEIL J, LUCUIK M, O'CONNOR J, DANGERFIELD J (2006) A life cycle environmental and economic assessment of optimum value engineering in houses. **For. Prod. J.** v. 56, n. 9, p. 19–25.

MICHELSSEN O, SOLLI C, STRØMMAN AH (2008) Environmental impact and added value in forestry operations in Norway. **J. of Ind. Ecology**, v. 12, n. 1, p. 69–81.

MINKOV N, SCHNEIDER L, LEHMANN A, FINKBEINER M (2015) Type III environmental declaration programmes and harmonization of product category rules: status quo and practical challenges. **J. of Clean. Prod.** v. 94, p. 235-246.

MILOTA M, PUETTMANN ME (2017) Life-cycle assessment for the cradle-to-gate production of softwood lumber in the pacific northwest and southeast regions. **For. Prod. J.**, v. 67, n. 5–6, p. 331–342.

MILOTA MR, WEST CD, HARTLEY ID (2005) Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood lumber production. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 47–57.

MIRABELLA N, CASTELLANI V, SALA S (2014) Forestry operations in the alpine context. Life cycle assessment to support the integrated assessment of forest wood short supply chain. *Intern. J. Life Cycle Assess.* v. 19, n. 8, p. 1524–1535.

MINAROVÍČOVÁ K, RABENSEIFER R (2013) Environmental analysis and a suggestion for assessment of detached houses. **Intern. Review of Appl. Sciences and Eng.** v. 4, n. 2, p.143-149.

MITTERPACH J, STEFKO J (2016) An Environmental Impact of a Wooden and Brick House by the LCA Method. **Key Eng. Mater.**, v. 688, p. 204–209.

MONAHAN J, POWELL JC (2011) An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy and Build.** v. 43, n. 1, p.179-188.

MOTUZIENE V, ROGOŽA A, LAPINSKIENE V, VILUTIENE T (2016) Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study. **J. of Clean. Prod.** v. 112, p.532-541.

MOLINA JC, JUNIOR CC (2010) Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina: Exact Sciences and Technology**. Vol. 31. p. 143-156.

MURPHY F, DEVLIN G, MCDONNELL K (2015) Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. **J. of Clean. Prod.** v. 92, p. 134–141.

MUNARO MR, FISCHER AC, AZEVEDO NC, TAVARES S F (2019) Proposal of a building material passport and its application feasibility to the wood frame constructive system in Brazil. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 225, p.1-18.

NAKANO K, SHIBAHARA N, NAKAI T, et al. (2018) Greenhouse gas emissions from round wood production in Japan. **J. of Clean. Prod.** v. 170, p. 1654–1664.

NHBC. **Housing Market Report**. N° 298. 2017. 31 p. Available on: <[https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707\\_Housing-Market-Report\\_Jul17.pdf](https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707_Housing-Market-Report_Jul17.pdf)>. Accessed on: Jul 10 2019.

ONEIL EE, JOHNSON LR, LIPPKE BR, et al. (2010) Life-cycle impacts of inland northwest and northeast/north central forest resources. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. SUPPL. 1, p. 29–5.

ONEIL E, PUETTMANN ME (2017) A life-cycle assessment of forest resources of the pacific Northwest, USA. **For. Prod. J.** v. 67, n. 5–6, p. 316–330.

ONEIL E, BERGMAN R, PUETTMANN M (2017) CORRIM: Forest Products Life-Cycle Analysis Update Overview. **For. Prod. J.** v. 67 (5/6) pp: 308-311.

PADILLA-RIVERA A, AMOR B, BLANCHET P (2018) Evaluating the Link between Low Carbon Reductions Strategies and Its Performance in the Context of Climate Change: A Carbon Footprint of a Wood-Frame Residential Building in Quebec, Canada. **Sustainability**, v. 10, n. 8.

PAJCHROWSKI G, NOSKOWIAK A, LEWANDOWSKA A, STRYKOWSKI W (2014) Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Construction & Build. Mater.* v. 52, p. 428–436.

PASSER A, KREINER H, MAYDL P (2012) Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings. **Intern. J. Life Cycle Assess.** v. 17, n. 9, p.1116-1130.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. Sistema Nacional de Avaliação Técnica - SINAT. Sistema Nacional de Avaliação Técnica. **Diretriz SiNAT nº 005 – Revisão 2** – Diretriz para Avaliação Técnica de Produtos – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas – Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”. Brasília: Ministério das Cidades, 2017. Available on: <[http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos\\_sinat.php](http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php)>. Accessed on: Jun 16 2019.

POMMIER R, GRIMAUD G, PRINCAUD M, et al. (2016) LCA (Life Cycle Assessment) of EVP - Engineering veneer product: Plywood glued using a vacuum moulding technology from green veneers. **J. of Clean. Prod.** v. 124, p. 383–394.

PROTO AR, BACENETTI J, MACRÌ G, et al. (2017a) Mechanisation of Different Logging Operations: Environmental Impact Assessment Using Life Cycle Assessment (LCA) Approach. **Chem. Eng. Transactions**, v. 58, p.229-234.

PROTO AR, BACENETTI J, MACRÌ G, ZIMBALATTI G (2017b) Roundwood and bioenergy production from forestry: Environmental impact assessment considering different logging systems. **J. of Clean. Prod.** v. 165, p.1485-1498.

PUETTMANN ME, BERGMAN R, HUBBARD S, et al. (2010) Cradle-to-gate life-cycle inventory of us wood products production: Corrim phase I and phase II products. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. SUPPL. 1, p. 15–28.

PUETTMANN ME, WAGNER FG, JOHNSON L (2010) Life cycle inventory of softwood lumber from the inland northwest us. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. SUPPL. 1, p. 52–66.

PUETTMANN ME, WILSON JB (2005) Life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 18–29.

RAMAGE MH, BURRIDGE H, BUSSE-WICHER M, et al. (2017) The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renew. and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p.333-359.

RAMASAMY G, RATNASINGAM J, BAKAR ES, et al. (2015) Assessment of environmental emissions from sawmilling activity in Malaysia. **BioResources**. v. 10, n. 4, p. 6643-6662.

RATNASINGAM J, RAMASAMY G, TOONG W, et al. (2015) An Assessment of the Carbon Footprint of Tropical Hardwood Sawn Timber Production. **BioResources**. v. 10, n. 3, p. 5174-5190.

SALAZAR J, MEIL J (2009) Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence. **J. Clean. Prod.** v. 17, n. 17, p.1563-1571.

SAUD P, WANG J, LIN W, SHARMA BD, HARTLEY DS (2013) A life cycle analysis of forest carbon balance and carbon emissions of timber harvesting in West Virginia. **Wood and Fiber Science**, v. 45, n. 3, p. 250–267.

SAUD P, WANG J, SHARMA BD, LIU W (2015) Carbon impacts of hardwood lumber processing in the northeastern United States. **Canadian J. For. Res.** v. 45, n. 12, p. 1699–1710.

SONNE E (2006) Greenhouse Gas Emissions from Forestry Operations: A Life Cycle Assessment. **J. Environ. Quality**. v. 35, n. 4, p. 1439–1450.

ŠVAJLENKA J, KOZLOVSKÁ M (2018) Houses Based on Wood as an Ecological and Sustainable Housing Alternative - Case Study. **Sustainability** v. 10, n. 5.

TAVARES V, LACERDA N, FREIRE F (2019) Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The “Moby” case study. **J. Clean. Prod.**, v. 212, p. 1044–1053.

THALLON R (2008) **Graphic guide to Frame Construction**. The Taunton Press.

TIMMERMAN V, DIBDIAKOVA J (2014) Greenhouse gas emissions from forestry in East Norway. **Intern. J. Life Cycle Assess.** v. 19, n. 9, p. 1593–1606.



United Nations Environment Programme - UNEP (2009) **Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers. UNEP Sustainable Buildings and Climate Initiative.**

[https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/buildings\\_and\\_climate\\_change.pdf](https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/buildings_and_climate_change.pdf). Accessed 02 Jan 2019.

\_\_\_\_ UNEP (2016) **The 10 Year Framework of Programmes on Sustainable Buildings and Construction.** UNEP.

<http://www.scpclearinghouse.org/sites/default/files/10yfp-sbc-brochure-en.pdf>. Accessed 02 Jan 2019

VERBEECK G, HENS H (2010) Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis. **Build. and Environ.** v. 45, n. 4. P. 964-967.

VILCEKOVA S, CULAKOVA M, BURDOVA EK, KATUNSKA J (2015) Energy and Environmental Evaluation of Non-Transparent Constructions of Building Envelope for Wooden Houses. **Energies** v. 8, n. 10, p. 11047–11075.

WANG S, ZHANG H, NIE Y, YANG H (2017) Contributions of China's Wood-Based Panels to CO<sub>2</sub> Emission and Removal Implied by the Energy Consumption Standards. **Forests** v. 8, n. 8.

WHITE MK, GOWER ST, AHL DE (2005) Life cycle inventories of roundwood production in northern Wisconsin: Inputs into an industrial forest carbon budget. **For. Ecology and Manag.** v. 219, n. 1, p. 13–28.

WILSON JB, SAKIMOTO ET (2005) Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood plywood production. **Wood and Fiber Science** v. 37, p. 58–73, 2005.

WINISTORFER P, CHEN Z, LIPPKE B, STEVENS N (2005) Energy consumption and greenhouse gas emissions related to the use, maintenance, and disposal of a residential structure. **Wood and Fiber Science** v. 37, p. 128–139.

WORDCLOUDS. Available on: <<https://www.wordclouds.com/>>

### 3.2 REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

Este trabalho de dissertação foca na avaliação dos materiais de madeira do sistema construtivo para o contexto brasileiro. No entanto, nota-se que a revisão sistemática de literatura apresentada no ARTIGO 1, retornou pesquisas principalmente internacionais, pouquíssimas em âmbito nacional, sendo esta uma limitação deste capítulo. Entende-se que dois motivos podem ter influenciado este resultado 1) o estado principiante do desenvolvimento de ACVs de processos



produtivos em âmbito nacional 2) pouca divulgação de estudos de ACV no contexto buscado em periódicos internacionais.

Assim, além do ARTIGO 1, outras referências envolvendo projetos, documentos e trabalhos de pesquisa - nacionais e internacionais - foram utilizadas como base para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação:

O CORRIM - *Consortium for Research on Renewable Industrial Materials* – é uma entidade americana sem fins lucrativos que conduz e gerencia pesquisas de ACV de produtos florestais nos EUA. O CORRIM foi fundado em 1974 para realizar um estudo de recursos renováveis para atender às futuras necessidades materiais da nação impulsionados pela crise do petróleo instalada naquele ano, por meio do estudo de das possíveis substituições de recursos não-renováveis por renováveis, e aliviar a dependência dos EUA de fontes estrangeiras de energia (MEIL et al, 2007). O projeto iniciou com o CORRIM Fase I, cujos resultados confirmaram que a indústria de produtos lenhosos poderia ter participação mais importante no consumo de recursos materiais e de energia do país, apontando algumas questões a serem melhoradas, como o aumento da recuperação de produtos do recurso florestal e o prolongamento da vida útil da madeira (MEIL et al, 2007). Contudo, em termos de fundamentos metodológicos, os resultados de CORRIM I eram direcionados para determinar a disponibilidade de recurso renovável e de energia “teórica” da indústria. Assim, 30 anos depois, foi lançado a o relatório CORRIM II, que segue um protocolo de ACV e de inventários do ciclo de vida para fornecer um banco de dados para avaliar a performance ambiental de produtos de madeira, a partir de uma visão mais específica e detalhada de processos (MEIL et al, 2007).

O CORRIM Phase II traz estudos de ACV de vários materiais de madeira como madeira serrada, compensado, OSB, LVL, MDF, *Glulam*, vigas I, treliças (CORRIM, 2020a, CORRIM, 2020b), alguns deles foram utilizados a como referência para o presente estudo, tanto em aspecto metodológico como de recorte para a pesquisa como produção de madeira serrada (PUETTMANN et al., 2013b; PUETTMANN, WAGNER e JOHNSON, 2010; MILOTA, WEST e HARTLEY, 2005; BERGMAN; BOWE, 2010; WILSON e SAKIMOTO, 2005); produção de OSB (PUETTMANN et al., 2013a; KLINE, 2005); ACV de edificação em WF (LIPPKE et al., 2004).

O ICE – *Inventory of Carbon and Energy* – um banco de dados de energia e carbono incorporado/embutido para materiais de construção, foi criado pela Universidade de Bath no Reino Unido por meio de um projeto para avaliar as implicações da incorporação de energia e carbono na construção de novos edifícios no Reino Unido (BSRIA, 2011). O projeto despertou o interesse de uma ampla gama de usuários além dos parceiros do projeto, e logo foi disponibilizado como uma base de dados de acesso livre (BSRIA, 2011), sendo que sua versão mais recente (3.0) data de novembro de 2019 (HAMMOND; JONES, 2019). A maioria dos dados de entrada provém de recursos de dados secundários, como artigos de periódicos, relatórios técnicos e trabalhos acadêmicos (BSRIA, 2011).

Considerou-se o ICE como referência para o desenvolvimento deste trabalho no sentido de abordar a EE e o carbono embutido para auxiliar a indústria da construção na contabilização de seus impactos. Ainda, tomou-se como referência a forma de obtenção de dados do ICE para parte deste trabalho, já que coleta dados brutos de fontes independentes e literatura aberta e os analisa rigorosamente para então apresentá-los de uma forma facilmente utilizável em cálculos e exemplos dos perfis dos materiais de construção (BSRIA, 2011).

A Declaração Ambiental de Produto (DAP) intitulada *Prefabricated Light WF Open Wall* (QWEB, 2019), foi base para o presente trabalho no sentido de recorte da análise, mais especificamente em relação aos limites do sistema. Tal DAP reporta o perfil ambiental da produção de 1 m<sup>3</sup> de parede em WF, desde a produção dos materiais de madeira a ela aplicados (madeira serrada, *Oriented Strand Board*-OSB, *Laminated Vaneer Lumber*-LVL, e compensado), semelhante ao que será apontado no objetivo desta pesquisa.

O trabalho de Garcia (2014) também foi referência para este trabalho, não só pela abordagem como também pela aplicação de alguns dados disponibilizados pela autora. Garcia (2014) estimou, por meio de uma ACV simplificada, uma faixa de variação da EE, emissões de CO<sub>2</sub> e geração de resíduos oriundos da produção de madeira serrada (bruta e aplainada), bem como de outros materiais de madeira aplicados na construção civil. A autora levantou dados de 19 empresas brasileiras - envolvendo madeiras tropicais nativas e exóticas plantadas - sendo que os dados levantados têm fronteiras variadas, alguns abrangendo dados de inventário desde a extração da matéria-prima, outros abrangendo apenas o beneficiamento da madeira na indústria.

Para a produção de uma tonelada seca de madeira serrada oriunda de florestas plantadas, Garcia (2014) aponta uma faixa de variação de 41 a 726 KgCO<sub>2</sub>/tonelada seca de produto (mediana de 155 KgCO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup>) - incluindo o transporte ao consumidor - que podem ser acrescidos de uma faixa de emissões 431 até 824 KgCO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup> (mediana de 685 KgCO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup>), no caso de produtos que recebem acabamento (segundo beneficiamento). A autora também aponta uma faixa de variação de 945 à 15.451 MJ t<sup>-1</sup> de madeira serrada (mediana de 9.062 MJ t<sup>-1</sup>) para madeira oriunda de florestas plantadas.

O trabalho de Monich (2012) estimou a energia e do carbono embutidos nos materiais que compõem uma habitação de interesse social (HIS) pré-fabricada em madeira, e a análise da contribuição do processo de manufatura desta no consumo energético total para a produção da habitação. A autora observou que o processo de beneficiamento da madeira dentro da fábrica acrescenta muito pouco em termos de EE, estimada em 2,96 MJ m<sup>-2</sup>, em relação ao valor da EE no beneficiamento dos materiais que a compõem, estimada em 2.400 MJ m<sup>-2</sup>;

O trabalho de Ramos (2019), por meio de uma ACV utilizando o *software* SimaPro, identificou os impactos ambientais provenientes do ciclo de vida completo de uma HIS em 3 sistemas construtivos distintos - alvenaria convencional, WF e Steel Frame (SF). A autora apontou que o WF é o sistema construtivo com menor participação na maioria das categorias de impacto avaliadas, sendo a chapa de gesso, o OSB e a telha cerâmica os materiais mais impactantes do sistema. Ainda, ao desenvolver a ACV no *software* de simulação, a autora adaptou à base de dados para a matriz de eletricidade nacional, obtendo impactos menores em relação à simulação com dados genéricos (representativos da média mundial), concluindo que a matriz de eletricidade nacional pode ser considerada mais sustentável que a média mundial.

O ARTIGO 1 e as pesquisas adicionais indicadas contribuíram com este trabalho tanto com parâmetros de resultados e conclusões, quanto em estrutura metodológica e protocolo de ações adotados.

## 4 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta as estratégias metodológicas que nortearam o desenvolvimento desta pesquisa, incluindo: a **classificação da pesquisa**, o **protocolo de ações** executadas, bem como a **descrição do estudo de caso**.

### 4.1 CLASSIFICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA

As pesquisas podem ser classificadas quanto ao **método científico** aplicado, **natureza**, **objetivo**, **procedimento** técnico para coleta de dados, e **abordagem** (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Esta pesquisa se propõe a descrever qualitativa e quantitativamente o ciclo de vida dos materiais de madeira comumente utilizados no sistema construtivo WF para o contexto brasileiro, desde as operações florestais à aplicação destes materiais na pré-fabricação vedações verticais em WF, por meio uma ACV simplificada (ACVE e ACVCO<sub>2</sub>). Para tanto, são utilizados dados da literatura técnica e dados primários coletados em uma empresa.

Com base em Prodanov e Freitas (2013) e Yin (2001), esta pesquisa pode ser classificada quanto ao **método científico** adotado, **indutivo**, já que argumentos dele derivados passam de um caso particular para o geral, em que as generalizações derivam de observações de casos da realidade concreta; quanto à sua **natureza**, **aplicada** pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais; quanto ao seu **objetivo**, **descritiva** pois deseja-se registrar, descrever, analisar e interpretar os fatos observados – de forma qualitativa e quantitativa - sem interferência ou manipulação do pesquisador, por meio de uma técnica padronizada de coleta de dados – a ACV. Quanto ao **procedimento técnico** empregado (a maneira como os dados da pesquisa são obtidos), a pesquisa se classifica como **um estudo de caso** pois envolve o estudo detalhado de um ou poucos objetos, de maneira que permite o seu amplo e detalhado conhecimento. Quanto à **abordagem**, **quantitativa e qualitativa**, pois ao mesmo tempo em que se quer descrever como ocorrem os processos, procura-se também medir algumas variáveis à medida em que ocorrem. A pesquisa se caracteriza como **quantitativa** pois busca traduzir informações em números, para classificá-las e analisá-las por meio do uso de recursos e de técnicas estatísticas. Ainda, se caracteriza como **qualitativa** pois o

processo é o foco principal, sendo coletados dados descritivos, retratando o maior número possível de elementos existentes na realidade estudada.

#### 4.1.1 Justificativa da escolha a partir do objetivo

Robson (2002) classifica as estratégias de pesquisa como fixas ou flexíveis. Entende-se que esta pesquisa se trata de um **estudo de caso**, pois envolve a seleção de um caso e o estudo deste caso em um contexto em que os detalhes se mostram ao longo da coleta de dados, portanto, segue uma **estratégia flexível**, ainda que envolva a coleta de dados quantitativos.

Quanto à abordagem técnica de coleta de dados, outros fatores à caracterizam como um **estudo de caso**, seguem algumas delas acompanhadas de suas justificativas:

- refere-se ao estudo minucioso e profundo de um ou mais objetos (YIN, 2001) – já que são analisados processos produtivos em detalhe;
- descreve a situação do contexto em que está sendo feita a investigação (PRODANOV; FREITAS, 2013) – já que os processos produtivos são descritos qualitativamente anteriormente à sua descrição quantitativa;
- investiga um fenômeno dentro de seu contexto da vida real (YIN, 2001) – já que são analisados processos produtivos - à medida que acontecem e sem interferências – e como são executados na realidade brasileira;
- pode permitir novas descobertas de aspectos que não foram previstos inicialmente (PRODANOV; FREITAS, 2013) - já que a ferramenta utilizada é a ACV, e que dentre seus objetivos está identificar pontos potenciais de melhoria ambiental, que podem descobertas não suspeitadas anteriormente;
- pode ser utilizado quando deliberadamente se quer trabalhar com condições contextuais – por acreditar que elas seriam significativas e pertinentes ao fenômeno estudado (YIN, 2001) – já que partiu-se do pressuposto que a fronteira geográfica e tecnológica pode trazer resultados variados em ACVs;
- é um sistema limitado e tem fronteiras em termos de tempo, eventos e processos (PRODANOV; FREITAS, 2013) – já que estas definições estão prescritas na primeira fase de uma ACV;

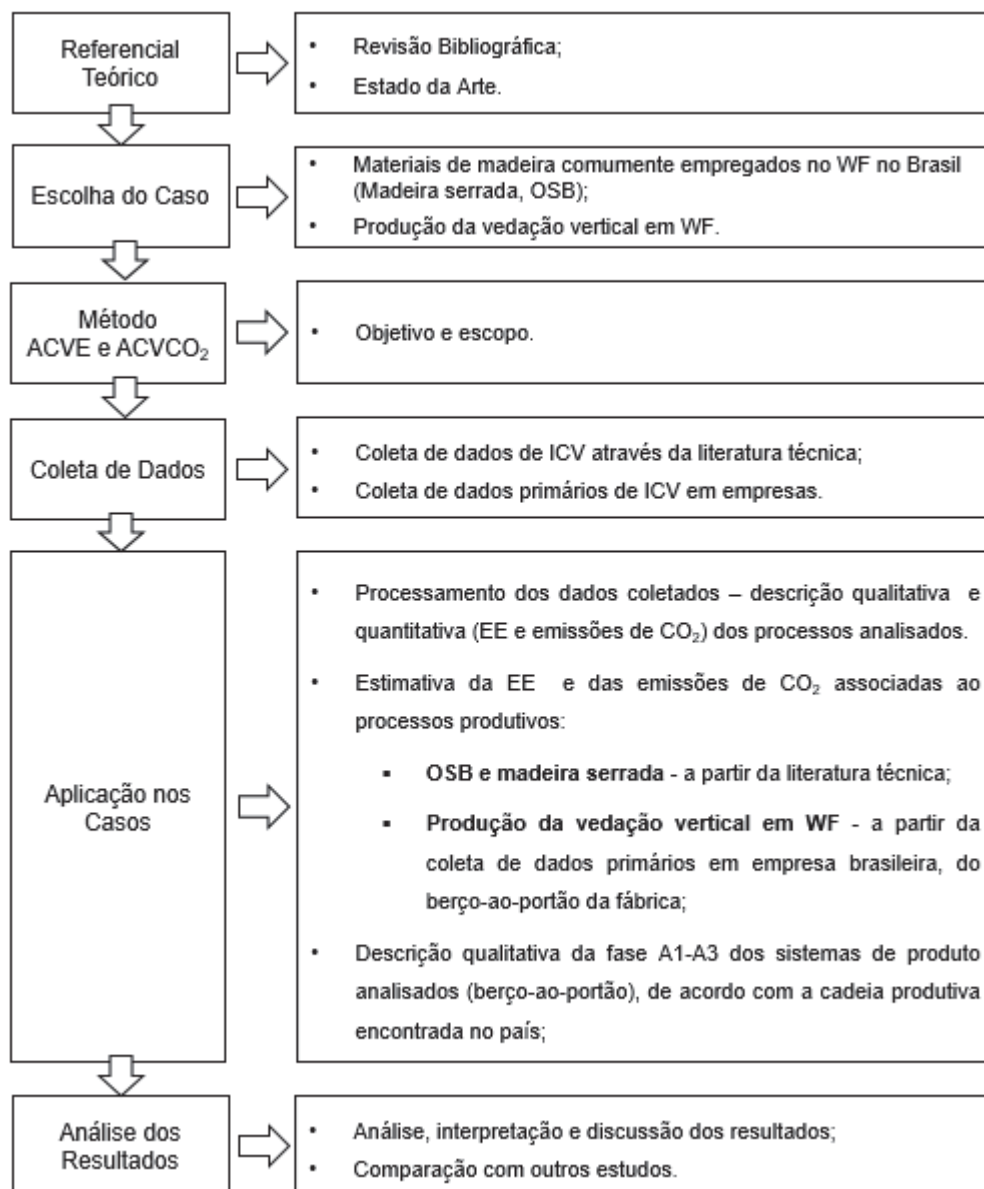
- o investigador recorre a fontes múltiplas de dados e a métodos de coleta diversificados (PRODANOV; FREITAS, 2013) – já que utilizou-se de dados da literatura técnica, medições *in loco*, entrevistas, questionários, consultas a documentos, entre outros.

Considerando-se a definição da unidade de análise, e por se tratar de levantamentos múltiplos, com base em Yin (2001), entende-se que esta pesquisa se trata de um **estudo de casos múltiplos**, já que “cada área analisada pode ser o objeto de um estudo de caso individual, e o estudo como um todo teria utilizado um projeto de casos múltiplos” (YIN, 2001). Neste caso, entende-se que, para esta pesquisa, cada subsistema seja uma subunidade de análise.

## 4.2 PROTOCOLO DE PESQUISA

Esta pesquisa está dividida em 6 etapas, indicadas na FIGURA 11.

FIGURA 11: ETAPAS DA PESQUISA.



FONTE: A autora (2019).

## 4.3 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A descrição do estudo de caso aborda a definição das unidades de análise e a delimitação da análise no estudo, e será apresentada de acordo com as fases de execução de um estudo de ACV, método utilizado na condução desta pesquisa (ACVE e ACVCO<sub>2</sub>).



#### 4.3.1 Unidade de análise

Segundo Yin (2001) a unidade de análise envolve a definição do que é o caso e está relacionada a maneira como as questões iniciais da pesquisa foram definidas. A unidade de análise deste estudo é a fase A1-A3, de acordo com EN 15978 (2011), do ciclo de vida dos materiais de madeira aplicados em vedações verticais em WF no Brasil, ou seja, das operações florestais à montagem das vedações verticais. Sendo assim, o objeto de estudo desta pesquisa pode ser subdividido em 4 outras subunidades de análise, são elas:

- I. Operações florestais;
- II. Processo produtivo da madeira serrada tratada;
- III. Processo produtivo do OSB;
- IV. Montagem industrial das vedações verticais em WF

#### 4.3.2 Definição do objetivo e escopo

O objetivo deste estudo contempla a aplicação pretendida, a razão para a execução do estudo e o público-alvo.

Reiterando o exposto no item 1.2, o **objetivo** principal desta pesquisa é, por meio de uma ACV simplificada, em termos dos indicadores de energia embutida (EE) e emissões de CO<sub>2</sub>, descrever qualitativa e quantitativamente o ciclo de vida dos materiais de madeira comumente aplicados no sistema construtivo WF para o contexto brasileiro. A avaliação aborda as fases A1-A3 do ciclo de vida de edificações, definidas na norma europeia EN 15978 (2011), que correspondem às etapas das operações florestais à aplicação dos materiais na pré-fabricação vedações verticais em WF.

As **razões para o desenvolvimento** são permeadas pela necessidade de geração de informação sobre o sistema construtivo WF para o contexto nacional, para que possam ser utilizadas pelas partes interessadas.

Além da entrega de resultados por meio de um trabalho de dissertação, a **aplicação pretendida** deste estudo é a informação de profissionais da construção sobre aspectos ambientais do WF, e eventualmente a utilização dos dados no desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados à cadeia produtiva em questão. Ainda, dados oriundos do projeto de pesquisa aprovado na Chamada MCTIC/CNPq

No 40/2018 – intitulado “Construção do Inventário do Ciclo de Vida do Sistema Construtivo *Wood Frame*”, foram parcialmente utilizados na obtenção dos resultados do ARTIGO 3 (CAPÍTULO 6) desta pesquisa. Apesar de os dados do projeto não terem sido utilizados em sua totalidade no desenvolvimento desta dissertação, em virtude do escopo desta pesquisa, vale ressaltar que a aplicação pretendida de tais dados é a alimentação do Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida – SICV-Brasil.

O **público-alvo** deste estudo pode incluir as indústrias da cadeia de produtos florestais, o mercado de construção WF, bem como os profissionais da construção, ACVistas; e outros pesquisadores da área.

O **escopo** contempla a **descrição do sistema de produto**; as **funções do produto**; indicação das **fronteiras** do estudo (limites do sistema, fronteiras tecnológica e geográfica); as **unidades funcionais**; as **entradas e saídas avaliadas**, procedimentos de **alocação**; **tipo e formato do relatório** selecionado para estudo.

O envelope da edificação é o principal diferencial do WF em relação a outros sistemas construtivos, sendo este o foco de análise desta pesquisa. Ainda, pelo fato de a madeira ser o material característico do WF (PBQPH, 2017), além de ser o seu principal componente em volume, optou-se por adotar **os materiais de madeira que compõem vedações verticais no sistema WF** como recorte da análise. Além dos materiais de madeira, são diversas as possibilidades de combinação com outros materiais no sistema WF para compor as camadas internas, intermediárias e externas das paredes, com diferentes formas de aplicação em edificações, tanto a nível internacional como nacional (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010; ESPÍNDOLA, 2017). Portanto, considerando-se a variação das soluções construtivas do sistema (ex: materiais com função de fechamento e/ou acabamento), as limitações de recurso, a intensidade do levantamento de dados, e a limitação de tempo, definiu-se os elementos estruturais de madeira como objetos desta avaliação, já que prezou-se por dados provenientes da realidade brasileira.

A **fronteira da análise** limita-se à produção dos materiais de madeira dentro da fase pré-operacional da edificação, ou seja, a fase A1-A3, definidas na EN 15978 (2011), para análises do ciclo de vida de edificações, como indica o destaque verde na FIGURA 12.

FIGURA 12: FASES DO CICLO DE VIDA INCLUSAS NA FRONTEIRA DE ANÁLISE DOS MATERIAIS DE MADEIRA APLICADOS ÀS VEDAÇÕES VERTICAIS.



FONTE: A autora (2020), traduzido e adaptado de EN 15978 (2011) e EN 15804 (2014).

Deve-se pontuar que a distinção entre a fase de produto e de construção no caso de edificações pré-fabricadas pode ser confusa, no sentido de que a pré-fabricação de elementos construtivos (ex: paredes, telhados) poderia ser parcialmente alocada tanto no estágio de produto (A1-A3) ou construção (A4-A5). Neste estudo, no entanto, as fronteiras da cadeia produtiva dos materiais de madeira até sua aplicação na pré-fabricação de paredes em WF foi convencionalizada como representativa para as fases A1-A3 do ciclo de vida de edificações, pelo fato de se referirem a processamentos que ocorrem anteriormente às atividades no canteiro de obras.

Com relação à **fronteira tecnológica**, a seleção do caso priorizou o principal objetivo desta pesquisa - descrever qualitativa e quantitativamente o ciclo de vida dos materiais de madeira utilizados no sistema construtivo WF **para o contexto brasileiro** – e, portanto, os casos avaliados representam tecnologia aplicada no Brasil. Para o subsistema de montagem industrial das vedações verticais em WF – para o qual dados primários foram coletados - entende-se que esta **tecnologia** é considerada **atual (current)**, já que o WF é tido como um sistema construtivo inovador no Brasil.

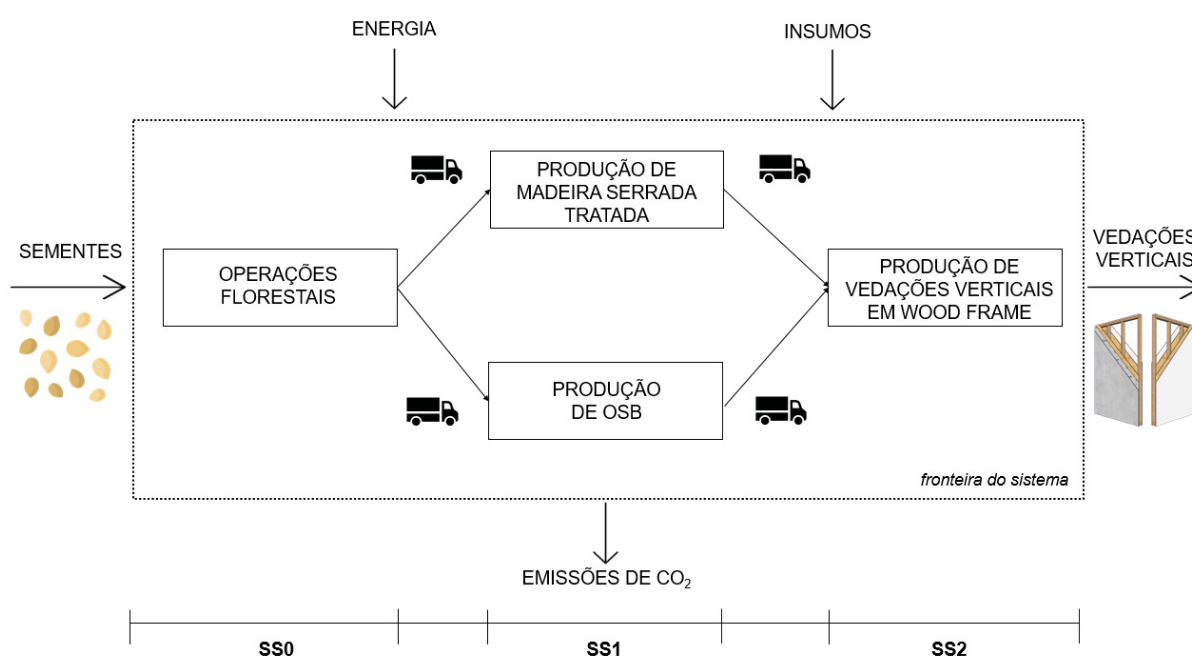
Considera-se a **fronteira geográfica** como **regional**, já que as empresas estão sediadas na região Sul do Brasil, que é cercada por uma importante produção industrial de toras e derivados de madeira (ABRAF, 2013).

Com relação às **entradas e saídas avaliadas**, em se tratando de uma ACV simplificada, esta pesquisa limita-se a quantificar apenas os **recursos energéticos (entradas)** empregados nos processos produtivos (e transportes) e as **emissões de**

**CO<sub>2</sub> associadas à utilização destes recursos (saídas)** dentro das fronteiras determinadas.

Entende-se que os processos analisados podem ser subdivididos em **3 subsistemas**: subsistema 0 (SS0), referente às operações florestais para a produção de toras de madeira; subsistema 1 (SS1), referente ao beneficiamento dos materiais de madeira; subsistema 2 (SS2), referente à montagem das vedações verticais em WF. A FIGURA 13 apresenta os processos avaliados, os indicadores escolhidos, bem como a divisão dos subsistemas para análise.

FIGURA 13: CADEIA PRODUTIVA DOS MATERIAIS DE MADEIRA ANALISADOS E DIVISÃO POR SUBSISTEMAS.



FONTE: A autora (2020).

Nos diferentes subsistemas, foram utilizadas diferentes **unidades declaradas**, pelos seguintes motivos: 1) como os dados dos subsistemas SS0 e SS1 foram obtidos da literatura técnica, optou-se por preservar a unidade declarada nos estudos de origem; 2) como o objetivo dos resultados obtidos nessa dissertação é a geração de informação, optou-se por declarar os resultados obtidos como processos isolados, tornando possível a sua aplicação isolada. Vale ressaltar que ao unir as contribuições de todos os processos avaliados, ou seja, na compilação de resultados da dissertação para o m<sup>2</sup> de vedação vertical, os resultados de EE e emissão de CO<sub>2</sub> para a unidade declarada nos subsistemas anteriores foram

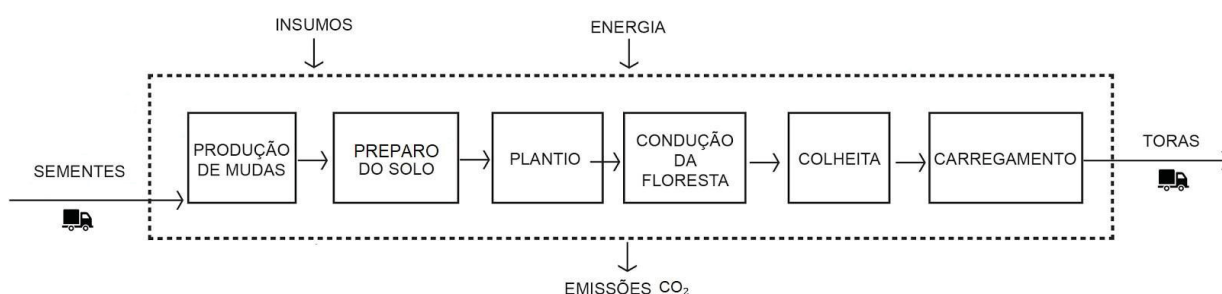
harmonizados para seus respectivos fluxos de referência<sup>12</sup> na composição da parede.

Nos subsistemas, são consideradas como matéria prima (fluxo principal) os materiais de madeira, e como insumos os materiais auxiliares.

#### 4.3.2.1 Subsistema 0 (SS0) - Operações florestais

Esta fase envolve as atividades de operações florestais para a produção de madeira bruta. O **SS0** tem fronteira equivalente à fase A1 – produção de matérias-primas - abrangendo as atividades florestais desde a preparo do solo, até a colheita florestal, representada pela FIGURA 14.

FIGURA 14: SUBSISTEMA DO PRODUTO SS0 – OPERAÇÕES FLORESTAIS.



FONTE: Fischer e Sanchotene (2019)<sup>13</sup>.

No SS0, a análise foi conduzida com base em dados da literatura técnica, em termos da unidade declarada **1 tonelada (t) de tora de madeira**. No SS0, são apontados os fluxos de entrada de matéria-prima (material lenhoso), insumos e energia (eletricidade, combustíveis, lubrificantes) no processo produtivo, e as saídas em termos de emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso dos recursos energéticos.

<sup>12</sup> Fluxo de referência é uma medida das entradas/saídas de processos requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional. Eles representam as quantidades de produtos necessárias para desempenhar a função (ABNT, 2009a) ou, nesse caso, compor a unidade declarada.

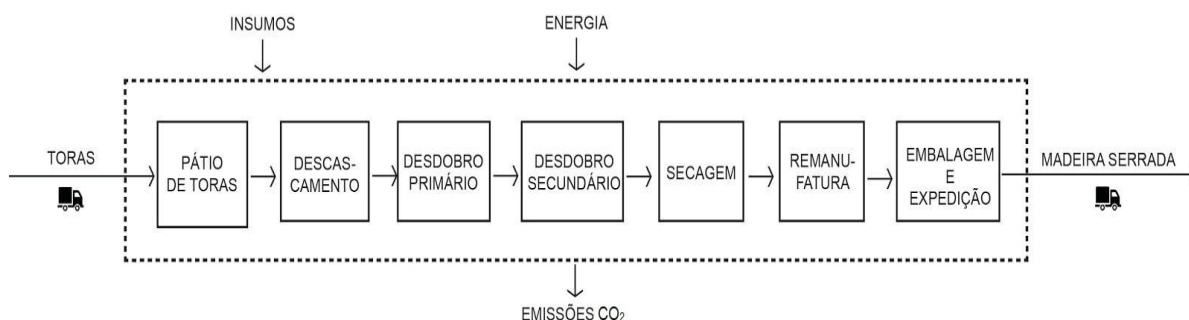
<sup>13</sup> Projeto de pesquisa intitulado Construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dos materiais lenhosos que compõem o Sistema Construtivo *Wood Frame* no contexto brasileiro, desenvolvida pelas mestrandas Anna Claudia Fischer e Camila Yara dos Santos Sanchotene, e apresentado à pela Chamada MCTIC/CNPq Nº 40/2018 - Apoio à produção de inventários de Avaliação de Ciclo de Vida (ICVs).

#### 4.3.2.2 Subsistema 1 (SS1) - Beneficiamento dos materiais de madeira

Esta fase envolve o beneficiamento dos materiais de madeira selecionados para a análise - madeira serrada e OSB – a partir das toras de madeira bruta. O **SS1** tem fronteira equivalente à fase A3 – produção de materiais - e abrange as atividades desde o recebimento das toras de madeira bruta nas indústrias até a entrega destes no portão de saída da fábrica.

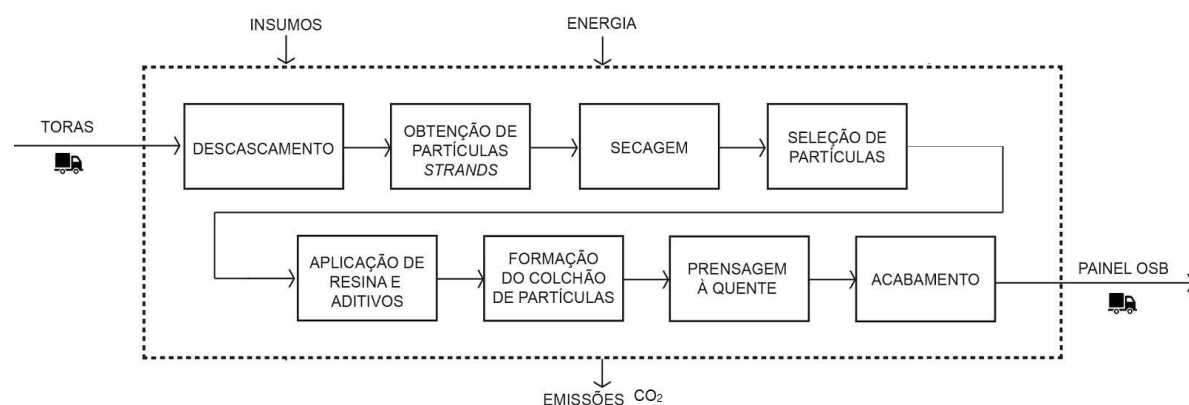
Considerando-se que serão analisados 2 materiais, o SS1 encontra-se dividido em duas partes: SS1a - produção de madeira serrada (FIGURA 15); SS1b - produção do OSB (FIGURA 16).

FIGURA 15: SUBSISTEMA SS1a - PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA.



FONTE: Fischer e Sanchotene (2019) adaptado de Bergman e Bowe (2010).

FIGURA 16: SUBSISTEMA SS1B - PRODUÇÃO DE OSB.



FONTE: Fischer e Sanchotene (2019) adaptado de Ferro et al. (2018).

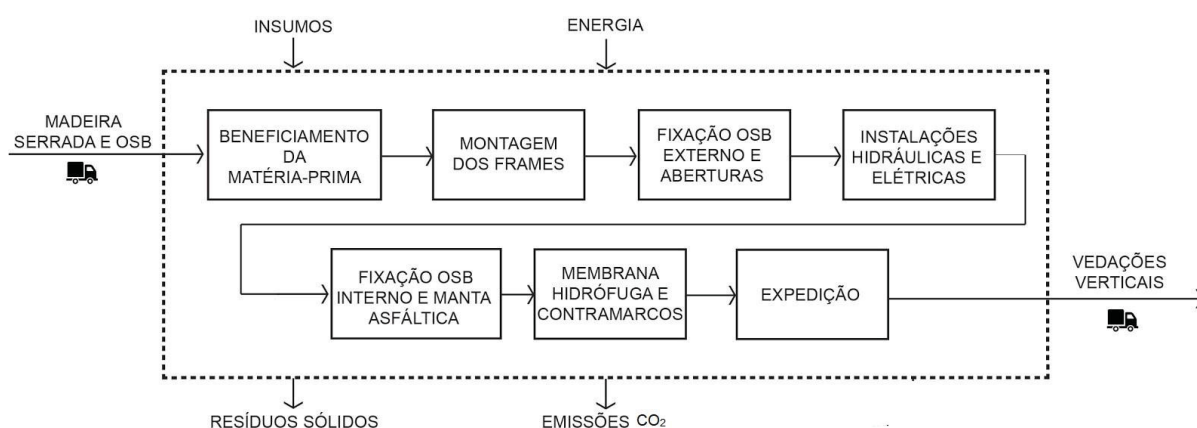
No SS1a e no SS1b, a análise foi conduzida em termos das unidades declaradas: **1 t seca de madeira serrada e 1 m³ de OSB**, respectivamente.

No **SS1**, são quantificados os fluxos de **entrada** de matéria-prima (material lenhoso), insumos e energia (eletricidade, combustíveis, lubrificantes) nos processos produtivos, bem como as **saídas** em termos de emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso dos recursos energéticos.

#### 4.3.2.3 Subsistema 2 (SS2) - Montagem industrial de vedações verticais em WF

Esta fase envolve a montagem industrial da vedação vertical em WF. O **SS2** também tem fronteira equivalente à fase A3 – produção de materiais, interpretando-se as VVs como um produto pré-fabricado para posterior transporte e utilização na fase de construção. Como apontado anteriormente, esta fase envolve apenas a montagem da VV, e não a execução de uma edificação completa, razão pela qual foi convencionada como fase A3. Esta fronteira abrange as atividades desde o recebimento dos materiais de madeira beneficiados na indústria de WF, até a finalização da execução da vedação vertical, representadas na FIGURA 17.

FIGURA 17: SUBSISTEMA SS2 - PRODUÇÃO DAS VEDAÇÕES VERTICAIS EM WF



FONTE: A autora (2020).

No SS2, a análise da produção das vedações verticais foi conduzida em termos das unidades declaradas **metro quadrado (m²) de vedação vertical externa, e 1 metro quadrado (m²) de vedação vertical interna**.

Para o **SS2** a análise foi conduzida com base em dados primários, e são quantificadas as **entradas** matéria-prima (material lenhoso), insumos e energia (eletricidade, combustíveis, lubrificantes), e as **saídas** em termos de emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso dos recursos energéticos no processo.

O QUADRO 1 apresenta um resumo das subunidades de análise envolvidas na pesquisa, dos subsistemas aos quais estão atreladas, da fonte de dados e do artigo em que o estudo detalhado pode ser encontrado.



QUADRO 1: SUBSISTEMAS E SUBUNIDADES DE ANÁLISE ENVOLVIDAS NO ESTUDO.

Subsistema	Subunidade de análise	Unidade declarada	Fonte de dados	Artigo
SS0	Operações florestais	1 t	Literatura técnica	2
SS1a	Processo produtivo da madeira serrada	1 t	Literatura técnica	2
SS1b	Processo produtivo do OSB	1 m <sup>3</sup>	Literatura técnica	2
SS2	Montagem da vedação vertical em WF	1 m <sup>2</sup>	Primários	3

FONTE: A autora (2020).

A NBR ISO 14040 (2009a) preconiza que em um estudo de ACV deve-se evitar ao máximo processos de alocação, já que isto envolve a geração de incertezas na qualidade dos dados. No entanto, na cadeia produtiva de materiais de madeira é comum a necessidade de algum **procedimento de alocação**, tendo em vista a geração de diversos coprodutos lenhosos durante o processo produtivo. Dessa forma, tanto nos subsistemas de colheita e beneficiamento da madeira (SS0 e SS1), quanto no subsistema de produção de vedações verticais (SS2), utilizou-se da alocação por massa para a distribuição dos fluxos elementares dentro de cada um dos processos produtivos para os produtos de interesse.

Como o objetivo deste estudo é uma análise simplificada por meio de apenas dois indicadores de desempenho ambiental de EE e emissões de CO<sub>2</sub>, este estudo não aborda categorias de impacto, métodos de avaliação de impacto, bases de dados, e nem a utilização de softwares de ACV.

#### 4.3.3 Inventário do ciclo de vida – coleta e processamento de dados

A **coleta de dados** desta pesquisa envolveu **duas abordagens**, cujos **resultados e relatório** encontram-se apresentados por meio de **artigos científicos**, que representam parcialmente a geração dos dados dessa dissertação.

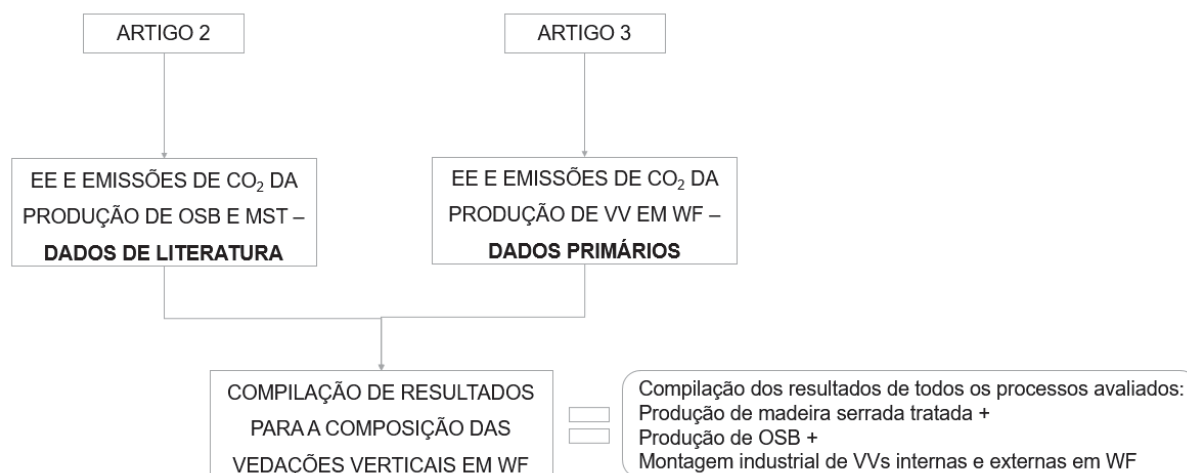
A análise dos subsistemas SS0 - Operações Florestais, SS1a – Produção de madeira serrada e SS1b – Produção de OSB, foi conduzida **a partir de dados da literatura provenientes de estudos de processos brasileiros**, e é apresentada no **ARTIGO 2**, intitulado “*Life Cycle Energy and Carbon Dioxide Emissions Assessment of the Production of Wood Materials Applied to the Wood Frame Construction for the Brazilian Context*” (Avaliação do ciclo de vida energético e das emissões de CO<sub>2</sub> associados à produção de materiais de madeira aplicados no sistema construtivo *Wood Frame* para o contexto Brasileiro). O **ARTIGO 2** encontra-se apresentado no **CAPÍTULO 5** desta dissertação.

A análise do SS2 – Produção das vedações verticais em WF, foi conduzida a partir de **dados primários coletados em uma indústria brasileira de produção de WF**, e é apresentada no **ARTIGO 3**, intitulado “*Embodied Energy and CO<sub>2</sub> Emissions Inventory of Industrial Production of Prefabricated Wood-Framed Walls: A Brazilian case study*” (Inventário de energia embutida e emissões de CO<sub>2</sub> da produção industrial de paredes pré-fabricadas em *Wood Frame*: um estudo de caso brasileiro). O **ARTIGO 3** encontra-se apresentado no **CAPÍTULO 6** desta dissertação.

Dados oriundos do projeto de pesquisa aprovado na Chamada MCTIC/CNPq Nº 40/2018 – intitulado “Construção do Inventário do Ciclo de Vida do Sistema Construtivo *Wood Frame*”, foram parcialmente utilizados na obtenção dos resultados do **ARTIGO 3**.

A FIGURA 18 ilustra o encadeamento de artigos e sequência de ações para a geração dos resultados dessa pesquisa.

FIGURA 18: ENCADEAMENTO DE ARTIGOS E COMPILAÇÃO DE RESULTADOS.



FONTE: A autora (2020).

Cada artigo apresenta seu método de desenvolvimento, resultados obtidos e discussão. Definições específicas das análises dos subsistemas definidos nesta pesquisa - quanto ao **produto**, **fronteiras**, **unidades declaradas** e aspectos metodológicos da ACV adotados - encontram-se detalhados nos referidos artigos. Os **procedimentos de cálculo**, **análise**, **interpretação e discussão dos resultados**, bem como a **comparação com outros estudos** também são apresentados. **Limitações dos estudos** também são abordadas.

Todos os artigos encontram-se apresentados em inglês por ser a língua mais empregada na para comunicar a ciência, além de aumentar sua probabilidade de atingir um maior número de leitores.

Como cada artigo apresenta dados referentes a distintos subsistemas envolvidos na análise, os resultados são compilados e harmonizados no CAPÍTULO 7 dessa dissertação, a fim de unir os dados da cadeia produtiva dos materiais de madeira com a aplicação na produção de vedações verticais em WF.

## 5 EMBODIED ENERGY AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS OF THE PRODUCTION WOOD-BASED MATERIALS APPLIED TO WOOD FRAME CONSTRUCTION: ASSESSMENT FOR THE BRAZILIAN CONTEXT.

**Authors:** Anna Claudia Fischer<sup>1</sup>, Nathalia Cardoso de Azevedo<sup>1</sup>; Sérgio Fernando Tavares<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Curitiba, Brazil;

### ABSTRACT

The construction industry (CI) is of great environmental importance as it is one of the main contributing sectors for global CO<sub>2</sub> emissions associated with the use of energy resources. The adoption of more sustainable materials and construction systems represents a potential point for reducing the negative environmental impacts of the sector. Based on the need for sustainability assessment in the CI, Life Cycle Assessment (LCA) - a standardized method for measuring environmental impacts of product systems - is an option to support decisions and act in the management of processes. Thus, taking as a motivation the generation of environmental information related to wood-based materials chain applied to the WF construction system in Brazil, this study analyzes the production processes of OSB and treated softwood timber for the Brazilian context, in terms of embodied energy (EE) and associated CO<sub>2</sub> emissions. This way, a Life Cycle Energy Assessment (LCEA) and CO<sub>2</sub> Assessment (LCCO<sub>2</sub>A) was conducted for the production of materials from data in the scientific literature, adopting a boundary from forestry operations up to the delivery of products at the factory gate. The results indicate EE of the order of 7.85 MJ kg<sup>-1</sup> for the production of softwood timber (78% from renewable and 22% from fossil origin), 8.26 MJ kg<sup>-1</sup> for treated softwood timber; 14.32 MJ kg<sup>-1</sup> for the production of OSB (73% from renewable and 27% from fossil origin). The associated CO<sub>2</sub> emissions to the evaluated processes are of 0.76 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> softwood timber production (90% from renewable and 10% fossil origin), 0.77 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> for treated softwood timber; and of 1.34 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> for OSB production (86% from renewable and 14% fossil origin). The results obtained in this study turned to be coherent to reference values presented in the international scientific literature, yet, they bring evidence that the Brazilian wood-based materials production processes tend to be supplied in greater proportion by renewable energy from woody biomass – and this associated to biogenic carbon emissions - in relation to other countries. The production phase of both materials was the greatest contributor to the EE and CO<sub>2</sub> indicators analyzed. The information generated through this study can be useful for construction professionals in decision making process due to its relevance to the CC impacts and simple interpretation; for society due to the generation of information about wood materials production in the national context; as well as contribute to the availability of data for the development of future research on the topic.

**Keywords:** OSB, timber, wood frame, LCEA, LCCO<sub>2</sub>A.

## 5.1 INTRODUCTION

The Construction Industry (CI) is responsible for the emission of approximately 30% of greenhouse gases (GHG), and represents more than a third of the world's total energy consumption, being responsible for approximately one third of the global CO<sub>2</sub> emissions associated with the use of energy resources (IEA, 2013). From this scenario, there are several opportunities for environmental improvement in the life cycle of buildings, being the choice of construction materials one of them.

As buildings become more energy efficient and less dependent on fossil fuels, the contribution of GHG emissions from the building production phase tends to become greater than the contribution of the operational phase, and thus, the materials used in construction phase correspond to a more representative portion of the total impacts (O'CONNOR; BOWICK, 2016). Given that, the impact of primary energy consumption in the manufacture of products and the reduction of GHG emissions over the entire life cycle of buildings has gained importance (HAFNER; RUTER, 2018).

The wood material chain has the potential to contribute to the development of more sustainable built environments, while it is a renewable source material, which seems to have environmental advantages over its alternative products, such as concrete, ceramic bricks, aluminum, and steel (BERGMAN et al, 2014; BUCHANAN; LEVINE, 1999). In this sense, Wood Frame (WF) – building system structured by timber studs and wood panels in combination with other materials - has wood as its characteristic material. The WF system is in process of consolidation in Brazil, with potential development not only due to its constructive advantages, but also for the country's recognized forest productivity.

The innovative characteristic attributed to the WF building system in Brazil, as well as the social and cultural barriers to the application of wood in construction for durable purposes in the country, emphasize the need for information generation about the system and the materials used in it.

Life Cycle Assessment (LCA) is a tool that can contribute to supplying demand for information about the WF building system and its components, while applying life cycle thinking in a quantitative way in the analysis of product systems, especially when it comes to insights about its environmental performance. Thus, in addition to informing, ACV can contribute to improvements in production processes.

However, LCA is a complex tool for execution and interpretation and, thus, simplified LCA methods emerge as a way of evaluating product systems, among them, the Life Cycle Energy Assessment (LCEA) and the Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions Assessment (LCCO<sub>2</sub>A). By means of an LCEA, only the consumption of energy resources over the life cycle of a product is assessed, and from its perspective, CO<sub>2</sub> emissions can be highlighted, since part of these emissions are generated by the consumption of energy resources, a large portion attributed to fossil fuels (TAVARES, 2006).

In this context, this study estimates Embodied Energy (EE) and CO<sub>2</sub> emissions associated with the use of energy resources in the production process of two wood-based materials commonly applied in the WF building system in Brazil - OSB and softwood timber. The method applied was an LCEA and LCCO<sub>2</sub>A, based on data from scientific studies developed in the Brazilian context. With the processed data, it is intended to make a contribution to the demand for generation and propagations of information about the WF in Brazil, both for decision makers, research development, as well as for the population, since the measurement of WF impacts is a starting point for improving the efficiency and environmental performance of its production chain, and thence its development.

#### 5.1.1 WOOD FRAME BUILDING SYSTEM IN BRAZIL

The SINAT N° 005 directive PBQP-H (2017), is the document which regulates the WF building system in Brazil while an official standard is not published. It defines WF as a building system whose main characteristic is to be structured by timber frames along with wood panels, in combination with other materials. Due to the country's hot and humid climate, timber structures must receive a preservative treatment so that the wood is resistant to attack by xylophagous organisms, thus increasing its durability. The external coating can consist of OSB panels or chemically treated plywood, applied together with cementitious plates. As an internal coating, in addition to the wooden panels, it is necessary to apply plasterboard. As thermal insulation, materials such as rock wool, glass wool, expanded polystyrene (EPS) board and other equivalent options can be applied. As for waterproofing, it is necessary to apply a vapor barrier-waterproof membrane. As for finishings, sidings or mortar coating with paint or texture finish can be applied (PBQP-H, 2017).

### 5.1.2 WOOD MATERIALS APPLIED TO THE WF IN BRAZIL

The main wood materials currently applied to the WF building system in Brazil are the OSB panels and softwood timber. Due to the country's hot and humid climate, wooden structures must receive a preservative treatment so that the wood is resistant to attack by xylophagous organisms, thus increasing its durability.

In Brazil, Pine (softwood) is commonly applied raw material, and, to a lesser extent, Eucalyptus (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Pine is preferred because, in addition to being a lighter wood, it has high permeability to the preservative treatment in autoclave, required for structural pieces of timber (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010; IPT, 2003).

As for OSB, in Brazil it is usually produced from pine wood, mainly *elliottii* and *taeda* (FERRO et al, 2018). The OSB panel is a structural sheet consisting of strips of wood, joined with water-resistant resins, oriented in three or five layers perpendicular to each other joined under high pressure and temperature (PBQPH, 2017). In the production process of OSB in Brazil there is the application of termicide, with the goal of increasing its resistance to the attack of degradation organisms. In addition, MDI resin (diphenylmethane diisocyanate) is the only binder resin used to produce OSB for structural uses in the Brazilian context, while in North American countries phenol-formaldehyde resins are used for the adhesion of OSB wood strips to superficial layers, and the MDI is only used for adhesion of the strips of the central layer (FERRO et al., 2018).

### 5.1.3 LIFE CYCLE ASSESMENT (LCA)

LCA is a standardized technique for assessing environmental aspects and potential impacts associated with a product system through the inventory of input and output flows of matter and energy in its life cycle (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Such flows can be quantified within the entire life cycle of a product, from the extraction and acquisition of raw materials (cradle), to its eventual final disposition (grave), based on a pre-defined established goal and scope (ABNT, 2009a). Thus, LCA can be interpreted as a methodological tool that applies life cycle thinking in a quantitative way in the environmental analysis of processes or products (FU et al., 2014).



In addition to informing, the knowledge generated from LCA studies can be used in decision making, and can be applied in support of strategic decision, aiming at improvements in production processes, product systems, or even productive sectors, as is the case of application of WF in Brazilian civil construction.

Being a complex assessment technique, more objective and simplified methods of LCA appear as a way to evaluate product systems. Among them, the Life Cycle Energy Assessment (LCEA) and Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions Assessment (LCCO<sub>2</sub>A), which are the methodological approach of the present study.

#### 5.1.3.1 Life Cycle Energy Assessment (LCEA)

LCEA prioritizes the inventory of direct and indirect energy resources consumption data associated to the life cycle of a product or process, and provides conditions for the evaluation of important environmental impacts, such as GHG emissions associated with the energy sources employed. Because it has a simpler structure, LCEA demands less costs and time in its execution (TAVARES, 2006).

Conducting an LCEA is associated with the determination of Embodied Energy (EE), that is, the amount of energy consumed to extract, refine, process, transport and manufacture a material or product (CIRCULAR ECOLOGY, 2019). Thus, the calculation of the EE in materials involves the quantification of the energy resources needed for its production processes.

#### 5.1.3.2 Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions Assessment (LCCO<sub>2</sub>A)

The Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions Assessment (LCCO<sub>2</sub>A) is another example of a simplified LCA method used to assess CO<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub> equivalent emissions associated to buildings life cycle (ATMACA; ATMACA, 2015).

GHG emissions are associated with the use of combustible energy resources, mainly fossils. Regarding fossil carbon, the amount of emissions is influenced both by the amount of primary energy needed to manufacture a certain type of material, and by the quality of the energy source used (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Therefore, just as EE is related to a product's life cycle, so are CO<sub>2</sub> emissions, which can then be used in process evaluation. One method of estimating

fossil carbon emissions associated with the production of a material is the conversion of energy consumption data, in which fossil carbon emissions are estimated by multiplying the energy used by the emission factors of the energy resources applied (CHAU ; LEUNG; NG, 2015), this being the strategy adopted in the present study.

## 5.2 METHOD

In this study, LCEA and LC CO<sub>2</sub>A were applied in order evaluate/assess the production processes of wood materials commonly applied to the WF system in Brazil. Pine timber and OSB production were analyzed. This study is described by the LCA phases, given that LCA simplified strategies are used.

### 5.2.1 GOAL AND SCOPE:

The goal of this study was to estimate the embodied energy (EE) and CO<sub>2</sub> emissions associated with softwood timber and OSB production, using data from the Brazilian context. The system boundaries include the extraction of raw materials, transportation activities, and material manufacturing; therefore, a cradle-to-gate scope was adopted. The analyses were carried out assuming declared units of 1 m<sup>3</sup> of OSB, and 1 ton of planed and treated softwood timber (Pine).

### 5.2.2 LIFE CYCLE INVENTORY

LCI involves data collection and calculation procedures to quantify the relevant inputs and outputs of a product system (ABNT, 2009a). It includes details of the inputs of matter and energy, and outputs in terms of emissions to air, soil and water. In this study, inputs of materials and energy, and outputs in terms of CO<sub>2</sub> emissions are assessed.

Inventory data from 2 main studies, one referring to softwood timber production and the other to OSB production, were used to estimate the EE and CO<sub>2</sub> emissions associated with the materials production. For this, average emission factors associated the energy resources use in the processes were applied. The CO<sub>2</sub> emission factors for Brazilian electricity were estimated using the method proposed by Tavares (2006), using data from the Brazilian Energy Balance (BEN, 2019). The

emission factors for other fuel sources use were obtained from IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006).

#### 5.2.2.1 Energy resources CO<sub>2</sub> emissions

Emission factors vary depending on the energy resource (e.g.: renewable or non-renewable sources); country or region – subject to energy mix and production technology variations; among others.

The CO<sub>2</sub> emission factor of Brazilian thermoelectricity was obtained from Tavares and Bragança (2016). In order to calculate the CO<sub>2</sub> emissions associated with Brazilian electricity production, the authors observed the energy sources and their respective contribution percentages to the Brazilian energy mix, their efficiency indexes, and then applied the specific emission factors for the fuels used. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** describes the estimated values for CO<sub>2</sub> emissions for thermoelectric generation in Brazil.

TABLE B 1: CO<sub>2</sub> EMISSIONS FOR BRAZILIAN THERMOELECTRICITY PRODUCTION

Coal	Brazilian Energy Mix (%)	Fuel Efficiency	Factor <sup>1</sup>	%	Emission Factor energy source (kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup> )	kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup> electricity
Oil	3.7	0.2	5.0	18.50	94.6	17.50
Natural gas	1.9	0.3	3.3	6.33	74.1	4.69
Coal	8.6	0.7	1.4	12.29	56.1	6.89
TOTAL						29.09

SOURCE: The authors, based on Tavares and Bragança (2016); EPE (2019) and IPCC (2006).

<sup>1</sup>Factor based on fuel efficiency in order to quantify the amount of fuel used to generate the respective contribution to the referred energy mix;

The CO<sub>2</sub> emission contributions for the other energy sources were defined based on the carbon emission factors obtained from IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006). **Erro! Fonte de referência não encontrada.** shows the CO<sub>2</sub> emission factors for other fuels used in the present study, and their respective calorific value data.

TABLE B 2: CALORIFIC VALUE AND CO<sub>2</sub> EMISSIONS BY ENERGY SOURCE.

Energy source	Calorific value	CO <sub>2</sub> emission factor
Diesel	<sup>(1)</sup> 10425 kcal kg <sup>-1</sup>	<sup>(3)</sup> 74.10 kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup> ; <sup>(4)</sup> 2.603 kgCO <sub>2</sub> l <sup>-1</sup>
Biodiesel BR	-	<sup>(4)</sup> 2.431 kg l <sup>-1</sup>
Crude Oil	<sup>(1)</sup> 10800 kcal kg <sup>-1</sup>	<sup>(3)</sup> 73.30 kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup>
LPG	<sup>(1)</sup> 11425 kcal kg <sup>-1</sup>	<sup>(3)</sup> 63.10 kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup>
Natural gas	<sup>(1)</sup> 41.58 MJ m <sup>-3</sup>	<sup>(3)</sup> 56.10 kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup>
Woody biomass	<sup>(2)</sup> 6.07 MJ kg <sup>-1</sup>	<sup>(3)</sup> 112.00 kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup>
Electricity	<sup>(1)</sup> 3.60 MJ kWh <sup>-1</sup>	<sup>(5)</sup> 29.09 kgCO <sub>2</sub> GJ <sup>-1</sup>

FONTE: <sup>1</sup>EPE (2019); <sup>2</sup> Garcia (2014); <sup>3</sup> IPCC (2006); <sup>4</sup>MMA (2014); <sup>5</sup>Authors (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Regarding transportation, the road transportation factor of 1.62 MJ tkm<sup>-1</sup>, obtained from the study by Tavares (2006), and the ocean transportation factor of 0.13 MJ tkm<sup>-1</sup>, obtained from IFIB (1995) apud Tavares (2006), were considered.

#### 5.2.2.2 OSB production inventory

OSB production inventory (input) data was obtained from Ferro et al (2018). In this study, the authors carry out an LCA of OSB Home Type production from a representative Brazilian industry, considering a cradle-to-gate boundary perspective. Analysis is divided into two phases: 1) forestry and 2) OSB production in the panel industry, presenting the materials quantities used in each phase, as well as the distances traveled for raw materials supply, and the energy inputs used in both phases.

From the OSB production inventory (input), it was possible to estimate the EE and CO<sub>2</sub> emissions associated with the use of energy resources and raw materials transportation in both forestry and OSB production phases. TABLE B 3 and TABLE B 4 present the input data as well as the EE and estimated CO<sub>2</sub> emissions, for forest operations and OSB manufacturing, respectively, both obtained from Ferro et al (2018) for the production of 1 m<sup>3</sup> OSB.

TABLE B 3: FORESTRY INVENTORY DATA FOR THE PRODUCTION OF 1 M<sup>3</sup> OF OSB.

PHASE SS0 – FOREST OPERATIONS FOR OSB PRODUCTION								
Input		Distance (km)	Qty. (t)	INPUT		OUTPUT		
				EE <sub>fos</sub> (MJ <sub>fos</sub> )	EE <sub>ren</sub> (MJ <sub>bio</sub> )	CO <sub>2</sub> <sub>fossil</sub> (kgCO <sub>2fos</sub> )	CO <sub>2</sub> <sub>bio</sub> (kgCO <sub>2bio</sub> )	
Raw material transportation	Herbicide	Glyphosate	2403	0.000240	0.832 <sup>a, b</sup>	0.103 <sup>a, b</sup>	0.061 <sup>b, c</sup>	0.007 <sup>b, c</sup>
	Pesticide	Sulfluramide	566	0.000480	0.392 <sup>a, b</sup>	0.048 <sup>a, b</sup>	0.029 <sup>b, c</sup>	0.003 <sup>b, c</sup>
	Fertilizers	Urea	2117	0.000126	0.385 <sup>a, b</sup>	0.048 <sup>a, b</sup>	0.028 <sup>b, c</sup>	0.003 <sup>b, c</sup>
		Ammonium sulfate	2389	0.000058	0.200 <sup>a, b</sup>	0.025 <sup>a, b</sup>	0.015 <sup>b, c</sup>	0.002 <sup>b, c</sup>
		Superphosphate	2173	0.001365	4.277 <sup>a, b</sup>	0.529 <sup>a, b</sup>	0.314 <sup>b, c</sup>	0.036 <sup>b, c</sup>
		Potassium chloride	2634	0.000458	1.739 <sup>a, b</sup>	0.215 <sup>a, b</sup>	0.128 <sup>b, c</sup>	0.015 <sup>b, c</sup>
TOTAL - Transport				7.82	0.96	0.57	0.07	
Process	Diesel BR		0.350 kg	13.16 <sup>b</sup>	1.63 <sup>b</sup>	0.97 <sup>b, c</sup>	0.11 <sup>b, c</sup>	
TOTAL - Process				13.16	1.63	0.97	0.11	
TOTAL PHASE SS0				20.99	2.59	1.54	0.18	

SOURCE: The authors, based on Ferro et al. (2018)

<sup>a</sup> road transportation factor of 1.62 MJ tkm<sup>-1</sup> (TAVARES, 2006);<sup>b</sup> proportion of 89% of pure diesel and 11% biodiesel in Brazilian diesel (ANP, 2020);<sup>c</sup> emission factors of 2.603 kgCO<sub>2fos</sub> l<sup>-1</sup> for pure diesel, and 2.431 kgCO<sub>2bio</sub> l<sup>-1</sup> for biodiesel (MMA, 2014);TABLE B 4: FACTORY MANUFACTURING INVENTORY FOR 1 M<sup>3</sup> OSB PRODUCTION.

PHASE SS1 – OSB PRODUCTION							
Input		Distance (km)	Qty.(t)	INPUT		OUTPUT	
				EE <sub>fos</sub> (MJ <sub>fos</sub> )	EE <sub>ren</sub> (MJ <sub>ren</sub> )	CO <sub>2</sub> fossil (kgCO <sub>2fos</sub> )	CO <sub>2</sub> bio (kgCO <sub>2bio</sub> )
Raw material transportation	Pine Roundwood	150	2.419	523.16 <sup>a,b</sup>	64.66 <sup>a, b</sup>	38.360 <sup>b, d</sup>	4.428 <sup>b, d</sup>
	MDI resin	9000	0.015	17.20 <sup>c</sup>	-	1.274 <sup>e</sup>	-
	Paraffin	100	0.007	1.01 <sup>a, b</sup>	0.12 <sup>a, b</sup>	0.074 <sup>b, d</sup>	0.009 <sup>b, d</sup>
	Termicide	100	0.001	0.14 <sup>a, b</sup>	0.02 <sup>a, b</sup>	0.010 <sup>b, d</sup>	0.001 <sup>b, d</sup>
TOTAL – Transport				539.61	66.69	39.72	4.44
Process	Diesel BR		0.98 kg	38.86 <sup>b</sup>	4.56 <sup>b</sup>	2.70 <sup>b, d</sup>	0.31 <sup>b, d</sup>
	GLP		0.18 kg	8.34	-	0.53 <sup>f</sup>	-
	Electricity		-	497.00	-	14.46 <sup>g</sup>	-
	Woody Biomass		-	-	6131	-	686.67 <sup>h</sup>
TOTAL – Process				542.20	6135.56	17.69	686.98
TOTAL PHASE SS1				1081.81	6202.25	57.41	691.42

SOURCE: The authors, based on Ferro et al. (2018).

<sup>a</sup> road transportation factor of 1.62 MJ tkm<sup>-1</sup> (TAVARES, 2006);<sup>b</sup> proportion of 89% of pure diesel and 11% biodiesel in Brazilian diesel (ANP, 2020);<sup>c</sup> ship transportation factor of 0.13 MJ tkm<sup>-1</sup> (IFIB (1995) apud Tavares (2006));<sup>d</sup> emission factors of 2.603 kgCO<sub>2fos</sub> l<sup>-1</sup> for pure diesel, and 2.431 kgCO<sub>2bio</sub> l<sup>-1</sup> for biodiesel (MMA, 2014);

<sup>e</sup> Diesel emission factor of 74.10 kgCO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (IPCC, 2006);

<sup>f</sup> LPG emission factor of 63.10 kgCO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (IPCC, 2006);

<sup>g</sup> Brazilian thermoelectricity production emission factor of 29.09 kgCO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**);

<sup>h</sup> Woody biomass emission factor of 112.00 kgCO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (IPCC, 2006).

MDI resin and paraffin perform great contribution regarding the EE and CO<sub>2</sub> variables analyzed in this study, hence their production inventories were considered in this study. EE and CO<sub>2</sub> emissions data related to MDI resin production in Europe were obtained from an EPD – Environmental Product Declaration - provided by ISOPA – European Diisocyanate & Polyol Producers Association (ISOPA, 2011). The EPD is valid until 2022 and was developed by PE INTERNATIONAL AG, within the EPDs Plastics Europe Program. As indicated in the study by Ferro et al (2018), the MDI resin applied in OSB production is imported from Germany and hence the authors consider it to be representative for the resin applied in the OSB production in Brazil, since 2 of the 6 companies considered in the EPD data survey are German. Data regarding the production of 1 kg of MDI resin are presented in TABLE B 5.

TABLE B 5: EE AND CO<sub>2</sub> EMISSION ASSOCIATED TO 1 KG OF MDI RESIN PRODUCTION.

Energy sources	EE <sub>fos</sub> (MJ)	EE <sub>ren</sub> (MJ)	CO <sub>2 fos</sub> (kgCO <sub>2</sub> )	CO <sub>2 bio</sub> (kgCO <sub>2</sub> )
Renewable/ Non-renewable	61.59	1.32*	2.04	-
TOTAL MDI RESIN	62.91 MJ		2.04 kgCO <sub>2 fos</sub>	

SOURCE: The authors, from ISOPA (2011).

\*Hydro (0.31 MJ), solar (0.53), wind (0.48).

NOTE: data is provided aggregated in the product's EPD.

Brazil still lacks LCA studies, inventories and consequently database sources for a number of products. Even though the paraffin applied to OSB Production is produced in Brazil, no paraffin wax production inventory was found to the Brazilian context. Thus, such data were obtained using the database provided by NREL– National Renewable Energy Laboratory in the US Life Cycle Database. The inventory data for the production of 1 kg of paraffin wax are shown in TABLE B 6.

TABLE B 6: EE AND CO<sub>2</sub> EMISSION ASSOCIATED TO 1 KG OF PARAFFIN WAX PRODUCTION.

PARAFFIN PRODUCTION					
Input	Quantity	INPUT		OUTPUT	
		EE <sub>fos</sub> (MJ <sub>fos</sub> )	EE <sub>ren</sub> (MJ <sub>ren</sub> )	EE <sub>fos</sub> (MJ <sub>fos</sub> )	EE <sub>ren</sub> (MJ <sub>ren</sub> )
Raw material transportation	2.30 tkm	3.32 <sup>a,b</sup>	0.41 <sup>a, b</sup>	0.2432 <sup>b,c</sup>	0.02 <sup>b,c</sup>
Process	Crude oil	1.02 kg	46.12	-	3.3807 <sup>d</sup>
	Diesel	0.0322 l	1.02 <sup>a,b</sup>	0.13 <sup>a, b</sup>	0.0746 <sup>b,c</sup>
	Electricity	0.00278 kWh	0.01	-	0.0004 <sup>f</sup>
	Natural gas	0.0000705 m <sup>3</sup>	0.003	-	0.0002 <sup>g</sup>
TOTAL PARAFFIN		50.47	0.54	3.70	0.03

SOURCE: The authors, from NREL (2019).

<sup>a</sup> road transportation factor of 1.62 MJ tkm<sup>-1</sup> (TAVARES, 2006);

<sup>b</sup> proportion of 89% of pure diesel and 11% biodiesel in Brazilian diesel (ANP, 2020);

<sup>c</sup> ship transportation factor of 0.13 MJ tkm<sup>-1</sup> (IFIB (1995) apud Tavares (2006));

<sup>d</sup> emission factors of 2.603 kgCO<sub>2</sub>fos l<sup>-1</sup> for pure diesel, and 2.431 kgCO<sub>2</sub>bio l<sup>-1</sup> for biodiesel (MMA, 2014);

<sup>e</sup> crude oil emission factor of 73.30 kg CO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (IPCC, 2006);

<sup>f</sup> electricity emission factor of 29.09 kgCO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**);

<sup>g</sup> natural gas emission factor of 56.10 kg CO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (IPCC, 2006).

### 5.2.2.3 Softwood timber production inventory

Timber production inventory data were obtained from the study by Garcia (2014). Through a simplified LCA format, the author estimated the EE, CO<sub>2</sub> emissions and waste generation for timber production (rough and planed) and also for other wood materials applied in civil construction. Garcia (2014) surveyed 19 Brazilian companies, and different boundaries and wood origins - native and planted forest wood - can be noticed among the surveyed companies' inventories.

For application in the present study, a selection of the companies in the study by Garcia (2014) was conducted, and only two of them met the profile fit of the present study, that is, they should meet the characteristics of the wood usually applied to the WF construction system: should be planted forest timber, and provide data of planed Pine timber. Two of the companies surveyed by Garcia (2014) met this profile, representing Pine planed timber production data. However, it could be noticed that one of them presented an inefficient production regarding wood residues



generation, presenting discrepant results in relation to the others. Thus, we selected the company number 4 from Garcia (2014) as a source of inventory data for the present study.

Regarding data from forestry operations, Garcia (2014) presents only data on fuels used in harvesting activities, not including other raw materials such as fertilizers, herbicides, and insecticides, such as those by Ferro et al (2018) for the OSB production. Thus, in order to have the timber and the OSB contemplate the same assessment boundaries, data from Ferro et al (2018) study were adapted for the forestry operations phase of timber production.

In Ferro et al (2018), 2.41 tons of pine logs are used to produce 1 m<sup>3</sup> of OSB. Analyzing the study by Garcia (2014), 1.9 ton of pine logs are needed to produce 1 ton of planed softwood timber. Thus, data were adapted in this proportion for forest operations of softwood timber, indicated in TABLE B 7.

TABLE B 7: FOREST INVENTORY DATA FOR THE PRODUCTION OF 1 TON OF PINE TIMBER.

PHASE SS0 – FOREST OPERATIONS FOR SOFTWOOD TIMBER PRODUCTION								
Input			Distance (km)	Qty. (t)	INPUT		OUTPUT	
					EE <sub>fos</sub> (MJ <sub>fos</sub> )	EE <sub>ren</sub> (MJ <sub>bio</sub> )	CO <sub>2</sub> fossil (kgCO <sub>2fos</sub> )	CO <sub>2</sub> bio (kgCO <sub>2bio</sub> )
Raw material transportation	Herbicide	Glyphosate	2403	0.00019	0.65 <sup>a, b</sup>	0.08 <sup>a, b</sup>	0.048 <sup>b,c</sup>	0.006 <sup>b,c</sup>
	Pesticide	Sulfluramide	566	0.00038	0.31 <sup>a, b</sup>	0.04 <sup>a, b</sup>	0.023 <sup>b,c</sup>	0.003 <sup>b,c</sup>
	Fertilizers	Urea	2117	0.00010	0.30 <sup>a, b</sup>	0.04 <sup>a, b</sup>	0.022 <sup>b,c</sup>	0.003 <sup>b,c</sup>
		Ammonium sulfate	2389	0.00005	0.16 <sup>a, b</sup>	0.02 <sup>a, b</sup>	0.012 <sup>b,c</sup>	0.001 <sup>b,c</sup>
		Superphosphate	2173	0.00107	3.36 <sup>a, b</sup>	0.42 <sup>a, b</sup>	0.246 <sup>b,c</sup>	0.028 <sup>b,c</sup>
		Potassium chloride	2634	0.00036	1.37 <sup>a, b</sup>	0.17 <sup>a, b</sup>	0.100 <sup>b,c</sup>	0.012 <sup>b,c</sup>
	TOTAL - Transport				6.14	0.76	0.45	0.05
Process	Diesel BR		1.78 l	56.24 <sup>b</sup>	6.95 <sup>b</sup>	4.12 <sup>b,c</sup>	0.48 <sup>b,c</sup>	
TOTAL - Process				56.24	6.95	4.12	0.48	
TOTAL PHASE SS0					62.38	7.71	4.57	0.53

SOURCE: The authors, based on Ferro et al. (2018) and Garcia (2014).

<sup>a</sup> road transportation factor of 1.62 MJ tkm<sup>-1</sup> (TAVARES, 2006);

<sup>b</sup> proportion of 89% of pure diesel and 11% biodiesel in Brazilian diesel (ANP, 2020);

<sup>c</sup> emission factors of 2.603 kgCO<sub>2fos</sub> l<sup>-1</sup> for pure diesel, and 2.431 kgCO<sub>2bio</sub> l<sup>-1</sup> for biodiesel (MMA, 2014);

TABLE B 8 presents the input data obtained from Garcia (2014), as well as the estimated EE and estimated CO<sub>2</sub> emissions for the production 1 ton of panned and dried softwood timber.

TABLE B 8: INVENTORY DATA THE MANUFACTURING OF 1 T OF PLANED AND DRIED SOFTWOOD TIMBER.

PHASE SS1 - SOFTWOOD TIMBER PRODUCTION							
Input	Distance (km)	Qty.	INPUT		OUTPUT		
			EE <sub>fos</sub> (MJ <sub>fos</sub> )	EE <sub>ren</sub> (MJ <sub>ren</sub> )	CO <sub>2</sub> <sub>fossil</sub> (kgCO <sub>2fos</sub> )	CO <sub>2</sub> <sub>bio</sub> (kgCO <sub>2bio</sub> )	
Raw material transportation	Pine Roundwood	80	1.90 t	219.15 <sub>a,b</sub>	27.09 <sub>a,b</sub>	16.07 <sub>b,c</sub>	1.85 <sub>b,c</sub>
TOTAL – Transport			219.15	27.09	16.07	1.85	
Process	Diesel BR	8.7 l	274.88 <sup>b</sup>	33.97 <sup>b</sup>	20.16 <sup>b,c</sup>	2.33 <sup>b,c</sup>	
	Electricity	328.7 kWh	1183.32	-	34.42 <sup>d</sup>	-	
	Biomass	995.9 kg	-	6045.11 <sub>e</sub>	-	677.05 <sup>f</sup>	
TOTAL – Process			1458.20	6079.09	54.58	679.38	
TOTAL PHASE SS1			1677.35	6106.17	70.65	681.23	

SOURCE: The authors, based on Garcia (2014).

<sup>a</sup> road transportation factor of 1.62 MJ tkm<sup>-1</sup> (TAVARES, 2006);

<sup>b</sup> proportion of 89% of pure diesel and 11% biodiesel in Brazilian diesel (ANP, 2020);

<sup>c</sup> emission factors of 2.603 kgCO<sub>2fos</sub> l<sup>-1</sup> for pure diesel, and 2.431 kgCO<sub>2bio</sub> l<sup>-1</sup> for biodiesel (MMA, 2014);

<sup>d</sup> electricity emission factor of 29.09 kgCO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**);

<sup>e</sup> woody biomass calorific value 6.07 MJ kg<sup>-1</sup> from Garcia (2014);

<sup>f</sup> woody biomass emission factor 112.00 kgCO<sub>2</sub> GJ<sup>-1</sup> (IPCC, 2006).

Pine, exotic tree in Brazil, presents low biological resistance to the attack of deteriorating agents, and hence, chemical treatment is required in order to ensure good performance during the building service life, especially in countries like Brazil, which has a hot and humid climate (VELLOSO, 2010; MOLINA; CALIL, 2010). Thus, timber applied to the WF construction system in Brazil must be treated with preservatives based on CCA-C (type C copper chrome arsenate) or CCB (copper chrome borate) or CA-B (copper and azoles) (PBQP-h, 2018). Data regarding timber preservation treatment process were considered in the present study for the total contribution of timber suitable for use in the WF system, and were obtained from Souza (2013), who estimated a contribution of 0.41MJ kg<sup>-1</sup> and 0.02kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> regarding EE and CO<sub>2</sub>.

## 5.3 RESULTS

### 5.3.1 OSB PRODUCTION

Based on the exposed data, TABLE B 9 presents the results of the estimates of EE and CO<sub>2</sub> emissions of the OSB production process. EE information is divided into fossils and renewables and the associated CO<sub>2</sub> emissions are divided into fossil and biogenic emissions.

TABLE B 9: EE AND CO<sub>2</sub> EMISSIONS FOR THE PRODUCTION OF 1M<sup>3</sup> OF OSB.

Phase/ Product	EE fossil (MJ)	EE renewable (MJ)	Total EE (MJ)	CO <sub>2</sub> fossil (kgCO <sub>2</sub> f <sub>os</sub> )	CO <sub>2</sub> biogenic (kgCO <sub>2</sub> bio)	Total CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> )
SS0 – FO*	20.99	2.59	23.58	1.54	0.18	1.72
SS1 –OSBP*	1081.81	6202.25	7284.06	57.41	691.42	748.83
MDI resin	905.40 <sup>a</sup>	19.40 <sup>a</sup>	924.78	29.99 <sup>a</sup>	0.00	29.99
Paraffin	353.28 <sup>b</sup>	3.75 <sup>b</sup>	357.03	25.89 <sup>b</sup>	0.24 <sup>b</sup>	26.13
TOTAL OSB (/m <sup>3</sup> )	2361.45	6228.00	8589.45	114.82	691.83	806.66
TOTAL OSB (/kg <sup>c</sup> )	3.94	10.38	14.32	0.19	1.15	1.34

SOURCE: The authors, based on Garcia (2014).

\*FO – forest operations / POSB - OSB production;

<sup>a</sup> value refers to 14.7 kg of MDI resin required for the production of 1 m<sup>3</sup> of OSB, from Ferro et al (2018) presented in TABLE B 4 and TABLE B 5.

<sup>b</sup> value refers to 7 kg of paraffin required for the production of 1 m<sup>3</sup> of OSB, from Ferro et al (2018) presented in TABLE B 4 and TABLE B 6.

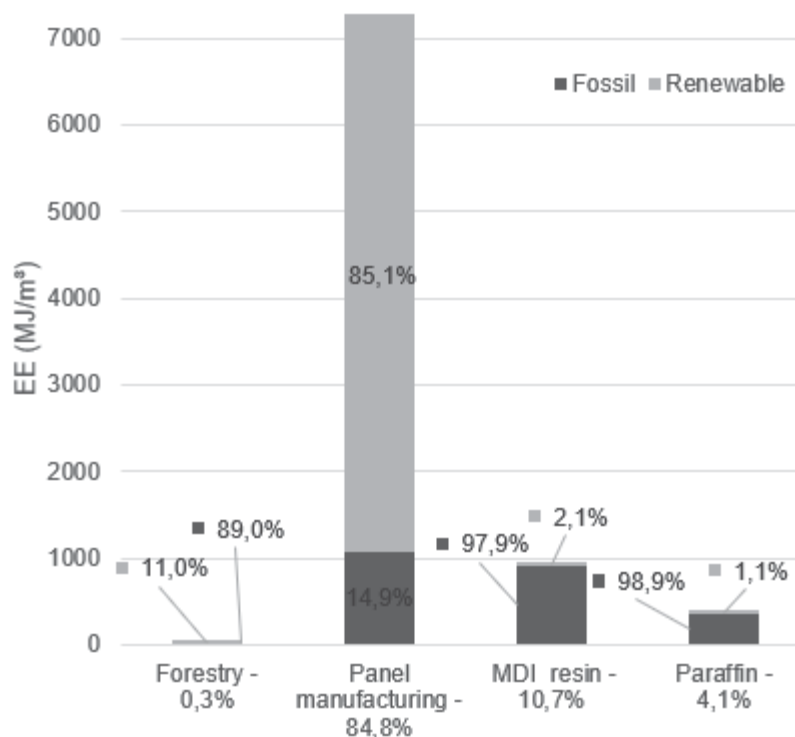
<sup>c</sup> OSB density – 600 kg m<sup>-3</sup> (FERRO et al, 2018).

The estimate for the whole OSB production indicates an EE of 8589.46 MJ m<sup>-3</sup> (14.32 MJ kg<sup>-1</sup>) associated with a CO<sub>2</sub> emission of 806.65 kg CO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup> (1.34 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>). From the 14.32 MJ kg<sup>-1</sup> of energy demand, 3.94 MJ kg<sup>-1</sup> (27%) are from fossil origin and 10.38 MJ kg<sup>-1</sup> (73%) from renewable origin. From the emission of 1.36 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> of material, 0.19 CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> (14%) from fossil origin and 1.15 CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> (86%) from biogenic origin.

FIGURE B 1 and FIGURE B 2 present the contributions of different activities in the production of OSB - regarding the demand for energy resources and the associated CO<sub>2</sub> emissions. It is possible to note that the greatest energy demand and CO<sub>2</sub> emissions come from phase SS1 - production of OSB at the panel factory, plus

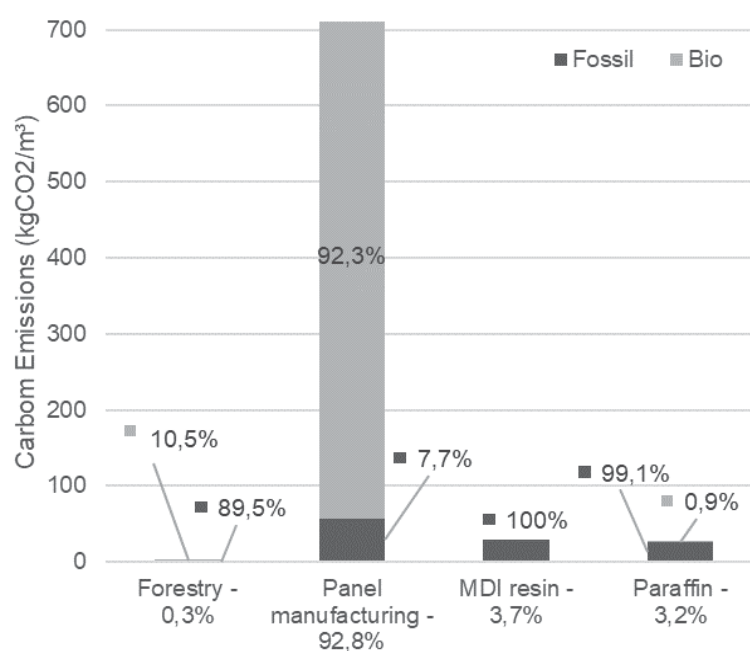
resin and paraffin production. Phase SS0 - forestry operations, contributed with less than 1% to both EE and CO<sub>2</sub> emissions associated with the process.

FIGURE B 1: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES FROM OSB PRODUCTION TO EE.



SOURCE: The authors (2020).

FIGURE B 2: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES IN THE PRODUCTION OF OSB TO CO<sub>2</sub> EMISSIONS.



SOURCE: The authors (2020).

## 5.3.2 PLANNED AND DRIED SOFTWOOD TIMBER PRODUCTION

Based on the exposed data, TABLE B 10 presents the results of EE and CO<sub>2</sub> emissions estimates for the production of treated softwood timber. As with the OSB, EE information is divided into fossil and renewable origin and the associated CO<sub>2</sub> emissions are divided into fossil and biogenic emissions.

TABLE B 10: EE AND CO<sub>2</sub> E EMISSIONS DE FOR THE PRODUCTION OF 1 T OF PLANNED AND DRIED SOFTWOOD TIMBER.

Phase/ product	EE <sub>fossil</sub> (MJ)	EE <sub>renewable</sub> (MJ)	Total EE (MJ)	CO <sub>2</sub> <sub>fossil</sub> (kgCO <sub>2fos</sub> )	CO <sub>2</sub> <sub>biogenic</sub> (kgCO <sub>2bio</sub> )	Total CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> )
SS0 – FO*	62.38	7.71	70.09	4.57	0.53	5.10
SS1 – STP*	1677.35	6106.17	7783.52	70.65	681.23	751.88
TOTAL PMS (t <sup>-1</sup> )	1739.73	6113.88	7853.62	75.22	681.76	756.98
Preservative Treatment (PT) (t <sup>-1</sup> )	410.00	-	410.00	12	-	12
TOTAL (MS+T) (t <sup>-1</sup> )	2149.73	6113.88	8263.61	87.22	681.76	768.98
TOTAL PMS (kg <sup>-1</sup> )	1.74	6.11	7.85	0.08	0.68	0.76
Preservative Treatment (PT) (kg <sup>-1</sup> )	0.41	-	0.41	0.01	-	0.01
TOTAL (MS+T) (kg <sup>-1</sup> )	2.15	6.11	8.26	0.09	0.68	0.77

SOURCE: The authors, based on Garcia (2014).

\*FO – Forest Operations / STP – Softwood timber production / PT – Preservative treatment

The estimate for the production of planned and dried softwood **untreated** timber an EE of 7853.62 MJ t<sup>-1</sup> (7.85 MJ kg<sup>-1</sup>) associated with a CO<sub>2</sub> emission of 756.99 kg CO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup> (0.76 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>). From the 7.85 MJ kg<sup>-1</sup> of energy demand, 1.74 MJ kg<sup>-1</sup> (22%) are from fossil origin and 6.11 MJ kg<sup>-1</sup> (78%) from renewable origin. From the emission of 0.76 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> of material, 0.08 CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> (10%) from fossil origin and 0.68 CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> (90%) from biogenic origin.

The estimate for planned and dried softwood **treated** timber indicates an EE of 8.26 MJ kg<sup>-1</sup> of material (2.15 MJ kg<sup>-1</sup> from fossil origin and 6.11 MJ kg<sup>-1</sup> from renewable origin), and an emission of 0.77 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> of material (0.09 CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> from fossil origin and 0.68 CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> from biogenic origin).

TABLE B 3 and TABLE B 4 present the contributions of different activities in the production of softwood timber - regarding the demand for energy resources and the associated CO<sub>2</sub> emissions.

FIGURE B 3: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES IN THE PRODUCTION OF SOFTWOOD TIMBER (UNTREATED) TO EE.

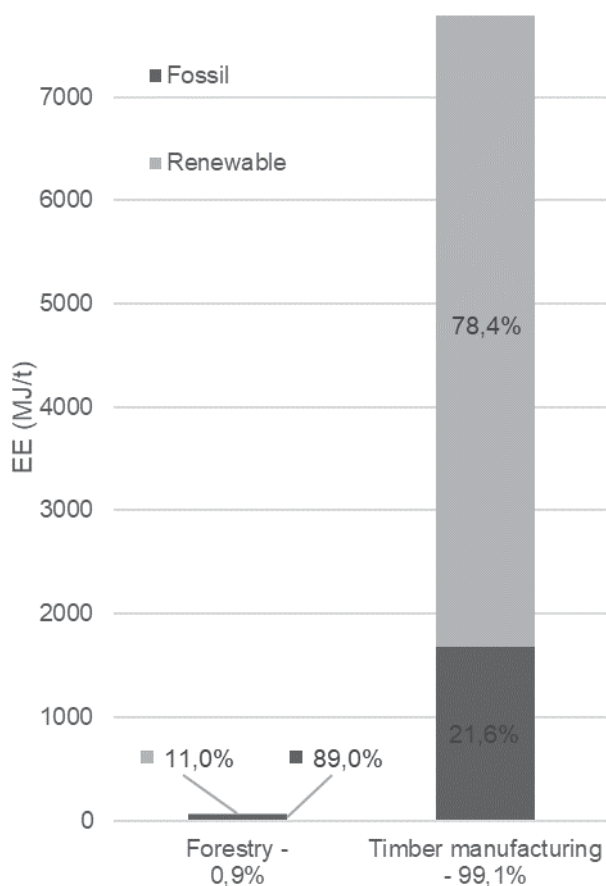
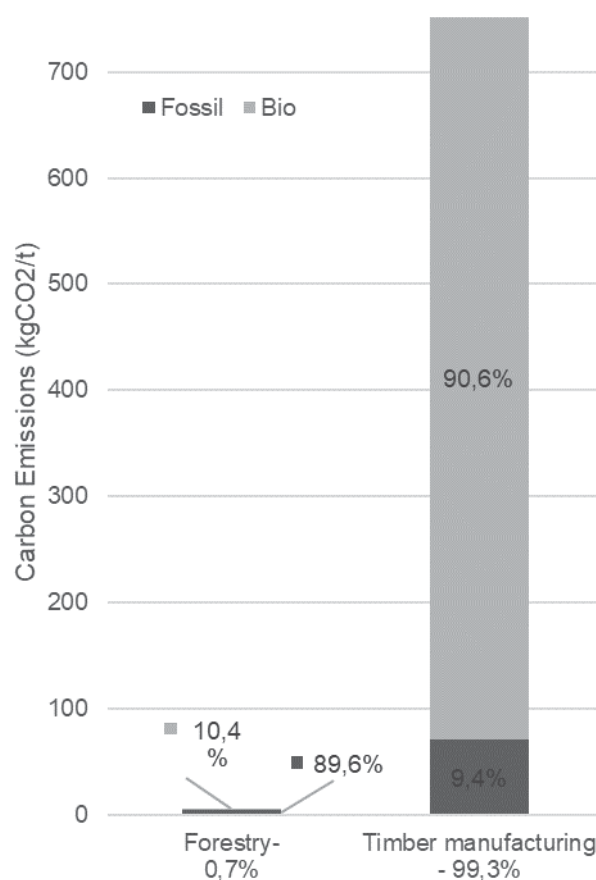


FIGURE B 4: CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ACTIVITIES IN THE PRODUCTION SOFTWOOD TIMBER(UNTREATED) TO CO<sub>2</sub> EMISSIONS.



SOURCE: The authors (2020).

It is possible to note that the greatest energy demand and CO<sub>2</sub> emissions come from phase SS1 – softwood timber manufacturing. Phase SS0 - forestry operations, contributed with less than 1% to both EE and CO<sub>2</sub> emissions associated with the process.

## 5.4 DISCUSSION

### 5.4.1 OSB PRODUCTION

Regarding the OSB industrial process (not including resin and paraffin production), it is important to point out that the majority (85%) of the energy used arises from renewable sources due to the use of biomass energy from burning woody residues, and this associated to biogenic CO<sub>2</sub> emissions. Regarding the OSB process as a whole (including MDI resin and paraffin loads), approximately 70%

(10.38 MJ kg<sup>-1</sup>) of the EE comes from renewable resources, and 30% (3.94 MJ kg<sup>-1</sup>) of from fossil sources. Regarding the associated CO<sub>2</sub> emissions, just like the energy demand, more than 90% (1.15 out of 1.34 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>) comes from biogenic sources.

Despite the minor mass participation of MDI resin and paraffin - it is observed that they contribute significantly to the total EE of the panel production. The MDI and resin inputs represent approximately 4% of the total mass of the OSB panel, and contribute to 10.7% and 4.1% (14.8%) of the EE, and to 3.7% and 3.2% (6.9%), CO<sub>2</sub> emissions arising from OSB production process, respectively. It is important to emphasize the distinct profile of the production process of these inputs compared to that of the OSB panel manufacturing, since the energy and raw material resources employed in them are almost entirely from fossil sources – MDI is plastic derived and paraffin's base raw material is crude oil.

TABLE B 11 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** presents reference values for OSB production by other authors. It is observed that the results of EE and CO<sub>2</sub> emission of the OSB production process in Brazil - estimated in this study – shown to be very similar to those presented in other studies from the scientific literature.

TABLE B 11: REFERENCE VALUES FOR OSB PRODUCTION BY OTHER AUTHORS.

Reference	EE (MJ m <sup>-3</sup> )	EE (MJ kg <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> )	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> )	Density (kg m <sup>-3</sup> )
The authors	8589.45	14.32	114.82 <sub>fos</sub> / 691.83 <sub>bio</sub>	0.19 <sub>fos</sub> / 1.15 <sub>bio</sub>	600
Puettmann e Wilson (2005)	11145.00	17.12	294 <sub>fos</sub> / 378 <sub>bio</sub>	0.45 <sub>fos</sub> / 0.58 <sub>bio</sub>	651
Kline (2005)	11318.18	17.43	269 <sub>fos</sub> / 426 <sub>bio</sub>	0.37 <sub>fos</sub> / 0.66 <sub>bio</sub>	649
Hammond e Jones - ICE (2011)	-	15.00	-	0.42 <sub>fos</sub> / 0.54 <sub>bio</sub>	-
Bribián, Capilla e Usón (2011)	-	36.33	-	-	600
Puettmann et al. (2013a)	9753.00*	15.03	248.18 <sub>fos</sub> / 335 <sub>bio</sub>	0.38 <sub>fos</sub> / 0.52 <sub>bio</sub>	649
Murphy, Devlin and McDonnell (2015)	5569.00	-	-	-	-
Bergman, Kaestner e Taylor (2016)	7789	13.04	-	-	597

SOURCE: The authors (2020).

fos – fossil emissions;  
bio – biogenic emissions.



It is observed that for EE, the studies by Puettmann and Wilson (2005); Kline (2005), Hammond and Jones - ICE (2011); Puettmann et al. (2013a), Bergman, Kaestner and Taylor (2016) presented very similar results to the EE herein estimated. Regarding the CO<sub>2</sub> emissions, these studies indicate the participation of 35%, 38%, 40% and 50% of energy use from biomass, respectively, of the total energy resources as being from biomass, which is possibly the factor responsible for the difference in fossil and biogenic CO<sub>2</sub> emissions between the studies. It is possible to note that these values are lower than the 70% estimated renewable participation in energy generation in this study, being this one of the most important differences between the Brazilian and international processes noted.

In the ICE database - Inventory of Carbon and Energy - database, Hammond and Jones (2011), indicate EE of 15 MJ kg<sup>-1</sup> of OSB, of which approximately 40% (5.9 MJ kg<sup>-1</sup>) would come from bioenergy. However, although the overall EE result was close to the estimate, in the present study, approximately 70% (10.38 MJ kg<sup>-1</sup> of 14.32 kg<sup>-1</sup>) come from renewable energy for the production of OSB. This fact points to evidence that the Brazilian productive process applies cleaner energy sources proportionally than that considered by Hammond and Jones (2011), and maybe others. Regarding CO<sub>2</sub> emissions, the same authors estimate emission of 0.42 kgCO<sub>2</sub> fossil and 0.54 kgCO<sub>2</sub> biogenic for the production of 1 kg of OSB. In contrast, in the present study, the emission of 0.19 kg CO<sub>2</sub> fossil and 1.14 kg CO<sub>2</sub> biogenic per kg of OSB is estimated. The difference in CO<sub>2</sub> emission values between the studies is justified by the proportion of fossil and renewable energy sources used in the different processes analyzed.

The study by Puettmann and Wilson (2005), in which approximately 67% (7412 MJ m<sup>-3</sup>) of the EE refers to the production of OSB, 28% (3126 MJ m<sup>-3</sup>) to the manufacture of resins, 2% (217 MJ m<sup>-3</sup>) the forest harvest phase and 3% is associated with transport in the production process. Other studies indicate similar proportions of use of energy resources between the phases of the OSB production process. Puettmann et al. (2013a) point to 2.4% of the EE (232.47 MJ m<sup>-3</sup>) associated with the forest phase and 97.6% (9520.51 MJ m<sup>-3</sup>) to OSB production. The EE and CO<sub>2</sub> emission loads distribution turned similar in the present study.

Even though the study by Murphy, Devlin and McDonnell (2015) resulted in lower EE for the OSB production process, the distribution of the use of energy resources between the phases is similar to the present and other studies - 97% for

the production of OSB and 3% for the forestry and transport phase. Still, Murphy, Devlin and McDonnell (2015) point out that 13% of the total energy resources are from biomass, which would indicate an emission of fossil CO<sub>2</sub> much higher than the other studies, however the authors present GHG emissions in terms of CO<sub>2</sub>eq in an aggregated way, thus impairing further comparison.

#### 5.4.2 SOFTWOOD TIMBER PRODUCTION

Regarding the softwood timber production process for the Brazilian context, similarly to OSB, a significant portion of EE ( approx. 74% - 78% - considering treated and untreated timber, respectively) - is from a renewable source predominantly due to the intense use of woody biomass as energy source, besides the small portion due to the biodiesel in the composition of diesel in Brazil. Likewise, around 90% of CO<sub>2</sub> emitted in softwood timber production arises from biogenic resources.

The timber manufacturing phase (SS1) - was the greatest contributor to total EE and CO<sub>2</sub> emissions - representing more than 99% in both categories. In consonance to this study, the other authors also point out that the wood processing phase is the one that demands the most energy. Garcia (2014) – reference study - mentions that most of the energy consumption occurs in drying process, which can be considered a process hotspot and where most of biomass energy is applied.

Forest operations (phase SS0) contribute to less than 1% of the total EE and CO<sub>2</sub> emissions associated with the analyzed case. It is important to note that, in the case of softwood timber estimates, the forestry inventory was adapted from Ferro et al, being that these forestry activities could be different for the original forest inventory proposed by Garcia (2014). Wood treatment adds 0.41 MJ kg<sup>-1</sup> of energy to the production phase, representing 5% of the total EE and approximately 2% of the CO<sub>2</sub> emissions associated to softwood timber production process.

TABLE B 12 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** presents reference values by other authors for the softwood timber production. Only softwood inventories were considered, since pine timber is the main one used in the WF construction system in Brazil.

TABLE B 12: REFERENCE VALUES FOR TIMBER PRODUCTION BY OTHER AUTHORS.

Reference	EE (MJ un <sup>-1</sup> )	EE (MJ kg <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> un <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> )	Density (kg m <sup>-3</sup> )
The authors <sup>a</sup>	7853.62 MJ t <sup>-1</sup>	7.85	75.22 <sub>fos</sub> and 681.76 <sub>bio</sub> kgCO <sub>2</sub> t <sup>-1</sup>	0.08 <sub>fos</sub> / 0.68 <sub>bio</sub>	-
Brand (2000)	537.33MJ t <sup>-1</sup> (b)	-	-	-	-
Puettmann and Wilson (2005)	3705.00 <sup>c</sup> MJ m <sup>-3</sup> 3492.00 <sup>d</sup> MJ m <sup>-3</sup>	8.97 <sup>c</sup> / 6.85 <sup>d</sup>	92 <sub>fos</sub> <sup>c</sup> and 160 <sub>bio</sub> <sup>c</sup> kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	0.22 <sub>fos</sub> <sup>c</sup> / 0.38 <sub>bio</sub> <sup>c</sup>	413/ 510
Milota, West e Hartley (2005) <sup>g</sup>	33633.0 MJ m <sup>-3</sup> 3954.52 MJ m <sup>-3</sup>	-	72 <sub>fos</sub> and 186 <sub>bio</sub> kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> 47 <sub>fos</sub> and 307 <sub>bio</sub> kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	-	-
Alcorn (2010)	1275 MJ m <sup>-3</sup>	2,77	-694 kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	-1.50 <sup>e</sup>	460
Bergman e Bowe (2010)	3085 <sup>k</sup> MJ m <sup>-3</sup>	.	65,1 <sub>fos</sub> <sup>k</sup> and 187 <sub>bio</sub> <sup>k</sup> kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	-	-
Puettmann, Wagner e Johnson (2010)	2911 <sup>h</sup> MJ m <sup>-3</sup>	6.67 <sup>h</sup>	72 <sub>fos</sub> <sup>h</sup> and 116 <sub>bio</sub> <sup>h</sup> kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	0.17 <sub>fos</sub> <sup>h</sup> / 0.27 <sub>bio</sub> <sup>h</sup>	436
Hammond and Jones – ICE (2011)	-	7.40	-	0.19 <sub>fos</sub> / 0.39 <sub>bio</sub>	-
Bribián, Capilla e Usón (2011)	-	20.99	-	-	600
Souza (2013)	-	0.69	-	-	-
Puettmann et al (2013b)	3532.25 MJ m <sup>-3</sup>	-	-	-	-
Murphy, Devlin and McDonnell (2015) <sup>f</sup>	761.00 MJ m <sup>-3</sup> 1460 MJ m <sup>-3</sup> 914 MJ m <sup>-3</sup>	-	-	-	-

SOURCE: The authors (2020).

<sup>a</sup>values for untreated wood;<sup>b</sup> approximately 0.98 MJ kg<sup>-1</sup> of timber, assuming a density of 550 kg m<sup>-3</sup>;<sup>c</sup> wood from the Pacific Northwest of the USA, density 413 kg m<sup>-3</sup>;<sup>d</sup> wood from the southeastern USA, density 510kg m<sup>-3</sup>;<sup>e</sup>authors considered the carbon storage in wood in the process balance emissions;<sup>f</sup> authors consider 3 scenarios for wood production;<sup>g</sup> authors calculate the results for two regions of wood production;<sup>h</sup> wood from the southeastern Indian Ocean, density 436 kg m<sup>-3</sup>;<sup>k</sup> wood from the northeast and central north of the USA.

The comparison to other studies illustrates the great variability in the results of EE and CO<sub>2</sub> emission associated with timber production processes, what brings us evidences of the heterogeneity of timber production activities.

Alcorn (2010), a New Zealand study, indicates similar the lowest values among the presented in **Erro! Fonte de referência não encontrada.** However, the author presents only energy from fossil sources in the process. In addition, Alcorn (2010) includes carbon storage when reporting the associated CO<sub>2</sub> emissions, impairing comparability with the present study.

Some authors present similar results for EE, such as Puettmann and Wilson (2005); Milota, West and Hartley (2005); Puettmann, Wagner and Johnson (2010); Hammond and Jones (2011); and Puettmann et al (2013b), being that they differ mainly in the proportion between fossil and biogenic CO<sub>2</sub> emissions, which are very dependent on the energy resources employed and the wood conversion efficiency of the processes. There are still discrepant EE values, in relation to the others, as is the case of Brand (2000) and Souza (2013), which indicate extremely low values of EE, and Bribián, Capilla and Usón (2011), which, in the opposite way, indicates high EE involved in the process. Variability can be seen even in studies that estimate data for various timber production processes, such as Murphy, Devlin and McDonnell (2015), in which it could be assumed a uniform approach of analysis.

Garcia (2014), whose data were used to obtain lumber inventory data in this study, points out the great heterogeneity in the production systems of different companies in Brazil, which motivated the author to use ranges of variation between minimum and maximum values of EE and CO<sub>2</sub> emissions from timber production for the 19 surveyed companies. According to the author, at the industry gate of the companies considered, a dry ton of timber from planted forests emits 32 to 559 Kg CO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup> (median of 92 Kg CO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup>) and has an EE of 729 to 14.944 MJ t<sup>-1</sup> (median 7.868 MJ t<sup>-1</sup>).

The factors presented bring evidence that the timber productive sector is heterogeneous, with regard to the technologies used in different companies, choice and efficiency of the energy resources employed, energy efficiency of the processes, qualification of the workforce, among others. However, methodological variations between the studies - such as the functional/ declared units adopted, system boundaries, level of detail of the LCA study, as well as the approaches in the collection of primary data or even the assumptions in the treatment and processing of data can be factors that potentialize the differences in estimates by other authors.

Some of the studies in TABLE B 12 include forest operations and forest management in the assessment of impacts, others start from the extraction process,

and there are still those that consider only the gate-to-gate boundaries. Even so, in order to compare and validate the data, it was decided to consider them since there are different ways of defining boundaries for LCA development, as well as methodological approaches to obtaining data, making it difficult to find studies that indicate identical scopes.

In general terms, it is believed that the results obtained in the present study turned out coherent. The estimates for both the OSB production, and the softwood timber production found to be similar to several studies with similar scope found in the technical literature.

Although this study intended to apply data on the production of materials for the Brazilian context, it should be noted that data from other researches were used, and therefore secondary, in order to contribute with estimated values of EE and CO<sub>2</sub> from the production of materials. In this context, it should be noted that the interpretation of the information provided in the studies from which the secondary data were obtained is challenging, and should be conducted with caution so as not to generate inconsistent results. The development of estimates can generate uncertainties due to data conversion factors, approximations and assumptions made during the calculations. Yet, for the present study, efforts were made in order to provide details of the calculation processes conducted.

It is important to note that several factors influence the conduction of studies like this and further comparison with other research. Differences in the conditions of timber extraction, technology used in the processes, qualification of the labor force, alternative production procedures are relevant factors for the variability of the results. Even the products options offered by companies can influence due to issues of allocation of environmental loads. Such facts generally imply comparability limitations with other studies, however, the same facts contributed to the motivation to seek an estimate for such processes in the Brazilian context.

Also, methodological issues are relevant to the comparability of studies. Geographical and technological representativeness are examples, since different countries or regions may have more or less efficient processes, as well as the composition of the local energy matrix can generate different results regarding the emission of polluting gases.

Among other limitations observed in this study, one of them was the choice of only one company to estimate EE and CO<sub>2</sub> of timber, in view of the heterogeneity of

the sector perceived during the development of the study. However, it is understood that the most consistent company in relation to the scope of the present study was selected from the data provided by Garcia (2014). Still, the inclusion of production data such for herbicides, insecticides and fertilizers used in forestry operations, thus increasing the study boundaries, could provide interesting discussions regarding the forestry operations phase, however, it was decided not to include them in the scope of this research, mainly due to the difficulty of obtaining national LCA data related to them.

## 5.5 CONCLUSIONS

In this study, the OSB and treated softwood timber production processes were analyzed for the Brazilian context in terms of embodied energy (EE) and CO<sub>2</sub> emissions through an LCEA and LCCO<sub>2</sub>A. The estimated results point to EE values close to those of the international technical literature for OSB and timber production.

It was observed that the production processes of wood materials in Brazil – timber and OSB - for the national reality, most of the energy demand is supplied by renewable sources, due to the use of woody biomass energy from the burning of wood residues, and this associated to biogenic CO<sub>2</sub> emissions. This may be one of the main points of difference of the national processes in relation to international processes, which present smaller contribution of biogenic emissions. The comparison of the results for timber with other studies indicated great variability of EE and CO<sub>2</sub> associated with the process, pointing to evidence of the heterogeneity of the productive sector.

Special attention should be given to the boundaries of the systems analyzed, assumptions and methodological issues, since they can generate uncertainties in the results and impair comparability between studies. Thus, it is emphasized that this study is configured as an estimate based on secondary data from the technical literature, and that in order to obtain more robust data, the development of studies based on primary data from LCI is suggested.

Still, as LCA develops in the world, the analysis becomes more and more specific, and geographic data factors become important for decision making, these other motivating factors for the development of LCA studies of materials wood based on primary LCI data and generation of information on national processes.

Finally, it is understood that there is a growing need for environmental information in relation to construction materials, and it is possible to note the need to generate information on wooden construction systems in Brazil, as well as on more sustainable construction systems for the civil construction in general. Thus, the results reported in this study can be useful for construction professionals in decision making processes within the development of projects, in addition to generating information on wooden materials for society and providing data for the development of further research in the theme.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Federal University of Paraná (UFPR), the Graduate Program in Civil Construction Engineering (PPGECC), and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for their financial support.

## REFERENCES

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ALCORN, J. **Global Sustainability and the New Zealand house**. A thesis submitted to the Victoria University of Wellington – Centre for Building Research. New Zealand, 2010.

AWC - American Wood Council; American Forest & Paper Association (AF&PA) (EUA). **Details for Conventional Wood Frame Construction**. Washington. AWC. 2001. 52 p.

ATMACA, A; ATMACA, N. Life cycle energy (LCA) and carbon dioxide emissions (LCCO<sub>2</sub>A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 417-431, 2015.

BERGMAN, R. D.; BOWE, S. A. Environmental impact of manufacturing softwood lumber in northeastern and north central United States. **Wood and Fiber Science**, v. 42, p. 67–78, 2010.



BERGMAN, Richard et al. The carbon impacts of wood products. **Forest Products Journal**, USA, v. 64, n. 7, p.320-332, out. 2014.

BERGMAN, R. D.; KAESTNER, D.; TAYLOR, A. M. Life Cycle Impacts of North American Wood. **Wood and Fiber Science**, v. 48, p. 40–53. 2016.

BRAND, M. A. **Rendimento do processo produtivo e energético da matéria-prima de uma indústria de base florestal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN A. A Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the ecoefficiency improvement potential. **Building and Environment**, 46, p. 1133-1140. Elsevier Science Ltd. 2011.

BUCHANAN, Andrew H.; LEVINE, S. Bry. **Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions**. Environmental Science and Policy, n. 2, p. 427-437. 1999.

CHAU, C.k.; LEUNG, T.m.; NG, W.y.. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, p.395-413, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>.

CIRCULAR ECOLOGY (Inglaterra). **Embodied energy and carbon - The ICE database**. Disponível em: <<http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.XQj0KIhKiUk>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2019**: Ano base 2018. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

ESPÍNDOLA, L. R. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. 2010. 331 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FAY, R.; TREOLAR, G; IYER-RANIGA, U. Life-cycle energy analysis: a case study. **Building Research & Information**, v. 28 (1), p. 31-41, 2000.

FERRO, F. S. *et al.* Environmental aspects of oriented strand boards production: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 710-719, 2018.

FU, Feifei et al. Development of a Carbon Emission Calculations System for Optimizing Building Plan Based on the LCA Framework. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, p.1-13, 2014. Hindawi Limited.

GARCIA, Katia Regina Punhagui. **Potencial de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera**. 2014. 422 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Programa Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio Ambiente En La Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluna, Universidad Politécnica de Cataluna e Universidade de São Paulo, Barcelona, 2014.

GONZÁLEZ-GARCÍA, Sara et al. Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 4, p.432-443, 2 fev. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0384-0>.

HAFNER, Annette; RUETER, Sebastian. Method for Assessing the National Implications of Environmental Impacts from Timber Buildings - An Exemplary Study for Residential Buildings in Germany. **Wood and Fiber Science**, v. 50, p.139-154, 13 ago. 2018. Society of Wood Science and Technology. <http://dx.doi.org/10.22382/wfs-2018-047>.

HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon and Energy - ICE**: Embodied energy and carbon - The ICE database - version 2.0. Universidade de Bath, 2011. Disponível em: [www.carbonsolutions.com/resources/ice%20v2.0%20-%20jan%202011.xls](http://www.carbonsolutions.com/resources/ice%20v2.0%20-%20jan%202011.xls). Acesso em: agosto de 2018

IBGE. **Estatísticas do século XX**: Estatísticas populacionais, sociais, políticas e culturais. Habitação e infra-estrutura. Prédios - por tipo de material da cobertura, segundo a situação do domicílio e o material das paredes e do piso — 1970. Disponível em: <https://seculoxx.ibge.gov.br/en/populacionais-sociais-politicas-e-culturais/busca-por-palavra-chave/habitacao-e-infra-estrutura/741-predio.html>. Acesso em: 15 maio 2018.

IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNAD Contínua**: Características gerais dos domicílios e dos moradores. 2017a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/habitacao/17270-pnad-continua.html?=&t=downloads>. Acesso em: 15 maio 2018.

IEA - International Energy Agency. **Transition to sustainable buildings**. Paris, 2013.

IFIB, Institut für Industrielle Bauproduktion. Baustoffdaten – Ökoinventare. Universität Karlsruhe; Lehrstuhl Bauklimatik und Bauökologie, Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB) Weimar; Institut für Energietechnik (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich; M. Holliger, Holliger Energie Bern: Karlsruhe / Weimar / Zürich. 1995.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC** - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland, 2006.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. São Paulo, 2003. 60 p.

KLINE, D. E. Gate-to-gate life-cycle inventory of oriented strandboard production. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 74–84, 2005. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-32644461614&partnerID=40&md5=00ce03e23364ec30759ff9afcfe13666>>.

MILOTA, M. R.; WEST, C. D.; HARTLEY, I. D. Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood lumber production. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 47–57, 2005. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-32644486263&partnerID=40&md5=348954c9e2d79046e600dd93d3948105>>.

MOLINA, Julio Cesar; CALIL JUNIOR, Carlito. **Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira**. **Exact and Technological Sciences**. Londrina, p. 143-156. dez. 2010. Available at: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/viewFile/4017/6906>>. Accessed on 24 Sep. 2018.

MURPHY, F.; DEVLIN, G.; MCDONNELL. Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 134-141. Elsevier Science Ltd. 2015.

NHBC. Housing Market Report. Nº 298. 2017. 31 p. Disponível em: <[https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707\\_Housing-Market-Report\\_Jul17.pdf](https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707_Housing-Market-Report_Jul17.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2019.

NREL, National Renewable Energy Laboratory. **U. S. Life Cycle Inventory Database**: Slack wax, at plant, US SE. Disponível em: <https://www.lcacommons.gov/lca-collaboration/search/query=wax>. Acesso em: novembro de 2018.

O'CONNOR, Jennifer; BOWICK, Matt. Advancing sustainable design with life cycle assessment. **Sustainable Architecture & Building Magazine** set. 2014. Disponível em: <<http://www.athenasmi.org/resources/publications/>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

O'CONNOR, Jennifer; BOWICK, Matt. **Embodied Carbon of Buildings**: International Policy Review. Vancouver, B.C. Canada: Athena Sustainable Materials Institute, 2016. Disponível em: <[http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2016/09/Embodied\\_Carbon\\_Policy\\_Review\\_August\\_2016.pdf](http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2016/09/Embodied_Carbon_Policy_Review_August_2016.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2018.

PAWELZIK, P. et al. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 23, p.211-228, fev. 2013.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **Diretriz SINAT nº 005** – Revisão 2 – Diretriz para Avaliação Técnica de Produtos – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas – Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”. Brasília: Ministério das Cidades, 2017.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **DATec nº 020-C** – Sistema Construtivo em peças leves de madeira serrada – TECVERDE: Tipo light wood frame. Brasília: Ministério das Cidades, 2018.

RAMAGE, Michael H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p.333-359, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.

PLASTICS EUROPE. **Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers**: Toluene Diisocyanate (TDI) and Methylenediphenyl Diisocyanate (MDI). ISOPA, 2011. Disponível em: <TTP://www.isopa.org/media/2609/eco-profile-mdi-tdi.pdf>. Acesso em: novembro de 2018.

PUETTMANN, M. E.; WAGNER, F. G.; JOHNSON, L. Life cycle inventory of softwood lumber from the inland northwest us. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. SUPPL. 1, p. 52–66, 2010. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77950278563&partnerID=40&md5=b12a1e93ca68a99fda00051e239f5cd8>.

PUETTMANN, M. E.; WILSON, J. B. Life Cycle analysis of wood products: cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 18-29. Society of Wood Science and Technology. 2005.

PUETTMANN, M. et al. **Cradle to gate life cycle assessment of oriented strand board production from the southeast**. CORRIM – Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, 2013a.

PUETTMANN, M. et al. **Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Softwood Lumber Production from the Pacific Northwest**. CORRIM – Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, 2013b.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. D. P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 309–326, 2018.

SOUZA, R. V. **Aspectos ambientais e de custo de produção do sistema plataforma em madeira para habitação de interesse social**: estudo de caso em Florianópolis 2013. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise de Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. 225 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. **Índices de CO<sub>2</sub> para materiais de construção em edificações brasileiras**. SBE 16 Brazil e Portugal, p. 927-936, 2016.

THALLON, R. **Graphic guide to Frame Construction**. 3 ed. Newtown: The Taunton Press, 2008.

TREOLAR, G.J. et al. Building materials selection: greenhouse strategies for built facilities. **Facilities**, vol. 19, p. 139-149. Emerald, Bradford. UK, 2001.

UNEP. **The 10 Year Framework of Programmes on Sustainable Buildings and Construction**. Disponível em:

<<http://www.scpclearinghouse.org/sites/default/files/10yfp-sbc-brochure-en.pdf>>.

2016. Acesso em: 16 jan. 2019.

UNEP. **Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers**. Paris: UNEP SBCI, 2009. Disponível em:

<[https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/buildings\\_and\\_climate\\_change.pdf](https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/buildings_and_climate_change.pdf)>. Acesso em: 09 jun 2019.

VELLOSO, J. G. **Diretrizes para construções em madeira no sistema plataforma**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

## 6 EMBODIED ENERGY AND CARBON EMISSION INVENTORY OF INDUSTRIAL PRODUCTION OF PREFABRICATED WOOD-FRAMED WALLS: A BRAZILIAN CASE STUDY.

Autores: Anna Claudia Fischer<sup>1</sup>, Camila Yara dos Santos Sanchotene<sup>2</sup>, Sérgio Fernando Tavares<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Curitiba, Brazil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, Curitiba, Brazil.

### ABSTRACT

The construction industry plays an important role towards global sustainable development due to the pressure it exerts on natural resources and energy consumption, and these associated with global environmental impacts. The continuous assessment of construction product chain plays an important role for a transition to a better environmental scenario. This study presents a gate-to-gate embodied energy and CO<sub>2</sub> emissions inventory of industrial manufacturing of prefabricated wood-framed walls in Brazil. Data covering 2019 average production of internal and external walls are presented. Results indicate a contribution of 13.51 MJ m<sup>-2</sup>, being 9.27 MJ m<sup>-2</sup> (68%) from transport activities and 4.23 MJ m<sup>-2</sup> (32%) associated to the industrial process. CO<sub>2</sub> emissions resulted in 0.51 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> for the prefabrication of an average WF wall, being 0.18 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> (36%) associated to transport activities and 0,33 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> (64%) associated to the industrial process. Raw material transportation seems to play an important role in prefabricated WF walls production. The results presented here can be used to conduct further research on the environmental performance of WF framed buildings as well as inform professionals and consumers of environmental aspects of this construction system under consolidation in Brazil with regional data.

Keywords: Life Cycle Assessment; Life Cycle Inventory; Embodied energy, CO<sub>2</sub> emissions.

### 6.1 INTRODUCTION

The construction industry (CI) has great responsibility towards the sustainable development in society. Its activities exert pressure on natural resources and energy use worldwide, associated with an important contribution to global environmental impacts (UNEP, 2009; UNEP, 2016; IEA, 2013, IPCC, 2014). Material choices, construction methods, operational efficiency and the promotion of circularity in buildings are potential opportunities in order to improve the social, economic and especially environmental impacts of the sector.



Life Cycle Assessment (LCA) is an internationally standardized technique for assessing environmental aspects of materials, products, services. Since it takes a life cycle perspective, and due to its quantitative and science-based approach (HAUSCHILD et al.2018), LCA has been widely adopted to evaluate the environmental impacts of building materials and buildings as a whole (BRIBIÁN IZ, USÓN A, SCARPELLINI S., 2009; BUYLE, BRAET, AUDENAERT, 2013), by means of research as well as its application in the development of EPDs of civil engineering materials (ACHENBACH, et al., 2016). Thus, LCA can be applied as a tool to identify potential points for improvement in the built environment, and thus, guide decision making in the CI.

Within the building life cycle, embodied emissions are considerable and will be more and more relatively significant among the total impacts by the built environment over time (GIESEKAM et al., 2014; e MAO et al., 2013). Due to the continuous progress on energy efficiency and renewable energy sources application on the use phase of buildings, the product and construction stages in building life cycle have gained importance and interest from researchers (BERGMAN et al. (2016) e HAFNER; RÜTER, 2018; IDDON; FIRTH, 2019).

The majority of embodied emissions are associated with the production of materials (GIESEKAM et al., 2014) and in the context of building material selection, renewable bioresources, such as the lignocellulosic materials are likely potential to contribute to the development of more sustainable built environments, since their manufacturing processes are usually less energy intensive and fossil fuel dependent, thus presenting environmental advantages in relation to its alternative products, such as concrete, ceramic bricks, aluminum, and steel (BUCHANAN; LEVINE, 1999; WERNER; RICHTER, 2007; BERGMAN et al, 2014).

Different construction methods also influence emissions in the construction phase. 'Modern methods of construction', 'industrialized building systems', 'prefabrication' and 'off-site construction methods' are common terms used to refer to construction partly manufactured at plants, transported, and finally assembled on site (ŠVAJLENKA, JOZEF; KOZLOVSKÁ, 2020). Research has indicated that prefabricated construction methods contribute to significant environmental benefits on GHG emissions in comparison to conventional construction methods (MAO et al., 2013).



Industrialized building systems are associated with efficient production, providing better quality and faster construction (NHBC FOUNDATION, 2016). The industrial production can also turn the CI less dependent on weather, and consequently, project delivery delays and inefficiency at the construction stage. It is also said to produce fewer defects and associated to lower consumption of energy and lower waste production (LOVELL; SMITH, 2010). These characteristics are a consequence of a better control usually presented by industrialized processes.

Hence, the wood-based products' forward-looking environmental characteristics allied to industrialized constructive systems, have caused current timber construction to be associated with cleaner construction, as well as lighter and more flexible buildings, what seems to be a great combination to satisfy the need for a more efficient and sustainable CI. From this perspective, construction systems and solutions that rely more renewable bioresources potentially present better environmental profiles considering the product stage of the building life cycle. However, these environmental aspects should be quantified in order to be managed, being LCA a great tool for that.

The Wood Frame construction system (WF) represents an application of timber construction over time. In the USA, it is the predominant building system - more than 90% of all new residential buildings in North America are made using some version of this construction method - and has been known to be historically durable and resistant (AWC AND AF&PA, 2001; THALLON, 2008). The system is also well established in other countries like Canada, Germany and Japan (ARAÚJO et al, 2016). In the United Kingdom and Scotland, approximately 20% and 80% of new homes are wooden structures respectively (NHBC, 2017). South American countries have also invested in the use of wooden structures for popular housing (ARAÚJO et al, 2016).

WF construction is in process of standardization and consolidation in Brazil. It started to have greater application in the country as of 2011, with the SiNAT 005 Directive, which regulates lightweight timber construction systems while an official national standard is not available. Considering the social and cultural barriers of the application of wood as a building material in Brazil (GARCIA, 2014; SOTSEK; SANTOS, 2018), there is a need to generate and spread information about the material and the WF construction system in order to collaborate with its development and continuous improvement. Thus, LCA can contribute to supplying the national

demand for characteristic information about the WF construction system and its components, generating knowledge about its environmental performance, in addition to acting as a management tool in the WF product chain.

Although international research reports environmental performance of the WF construction system within the building life cycle during the life cycle of buildings (ACHENBACH, WENKER AND RÜTER, 2018; DIYAMANDOGI, FORTUNA, 2015; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2012; KILDGAARD ET AL., 2013; LIPPKE et al., 2004; MALONE et al., 2014; GUSTAVSSON; PINGOUD; SATHRE, 2006; SALAZAR AND MEIL, 2009; PADILLA-RIVERA, AMOR AND BLANCHET; 2018) as far as the authors are concerned, there aren't LCA studies with primary data collected from the Brazilian reality. Therefore, for the national context, there are uncertainties related to the environmental profile of this construction system because little is known about the real impacts of the national WF.

Therefore, this study aimed to analyze the gate-to-gate industrial production of Brazilian prefabricated wood-framed walls in order to provide a representative LCI of this production process and discuss its main characteristics considering the product and construction stage of the building life cycle (modules A2-A3), in terms of energy consumption and associated CO<sub>2</sub> emissions).

This LCI can be used in turn to conduct assessment of prefabricated WF buildings, help the informed decision making by the CI professionals as well as in benchmarking with other constructive systems.

## 6.2 METHODS

For this study, ISO 14040 and 14044 (2006) standards have been followed, and thus, it is organized and described following the LCA stages. The goal of the study was to report an energy and CO<sub>2</sub> emissions LCI and discuss the main characteristics of wood-framed walls prefabrication and, hence, the impact assessment stage was not addressed.

### 6.2.1 Goal and scope definition

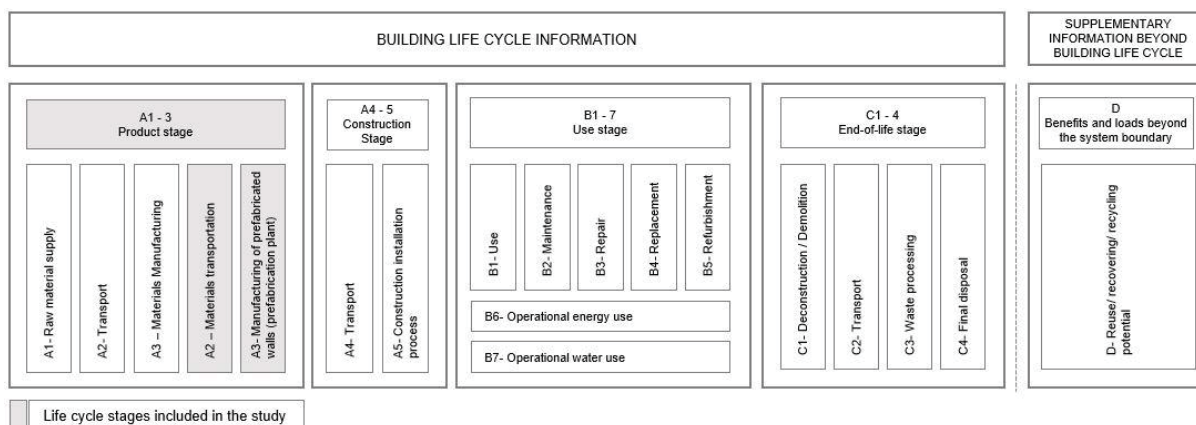
The goal of this study is to report an energy and CO<sub>2</sub> emissions LCI with accurate data on inputs and outputs related to industrial manufacturing of Brazilian

prefabricated WF walls, as well as contribute to the national database of Life Cycle Inventories - SICV Brasil. The data followed the guidelines of the series of ISO 14040 (ISO, 2006a; ISO, 2006b) standards and the Qualidata Guide (GUIA QUALIDATA, 2016), which recommends quality requirements for data sets for the referred national LCI database.

The company considered for the case study is located in Paraná state, Brazil. The company's production is considered representative for the national reality since it has held projects in 4 of the 5 big Brazilian regions and also because it is one of the only companies to industrially produce prefabricated wood-framed buildings in Brazil up to the moment. The factory is placed in the Southern Brazil region, surrounded by an important industrial production of roundwood and wood products, including wood-based panels, furniture, pulp and paper, resin extraction and timber.

Concerning buildings' life cycle stages, FIGURE C 1 shows the life cycle stages involved in this inventory according to the EN 15978 (2011) modular conception. This European Standard specifies the calculation method to assess the environmental performance of a building based on LCA and other quantified environmental information, by reporting assessment results by means of information modules which represent building life cycle stages. Based on EN 15978 (2011) information modules, stages A2-A3 are approached in this study, covering material inputs transportation to factory and the prefabrication of WF walls. It should be emphasized, yet, that the WF walls prefabrication is susceptible to more interpretations, since the process also partially represents a contribution to the system construction stage, if comparing the WF walls on-site construction to other building systems. In this study, however, prefabrication was conventioned as a product stage.

FIGURE C 1: CONSIDERED LIFE-CYCLE STAGES ACCORDING TO EN 15978 (2011).



Source: the authors (2020) based on EN 15978 (2011).

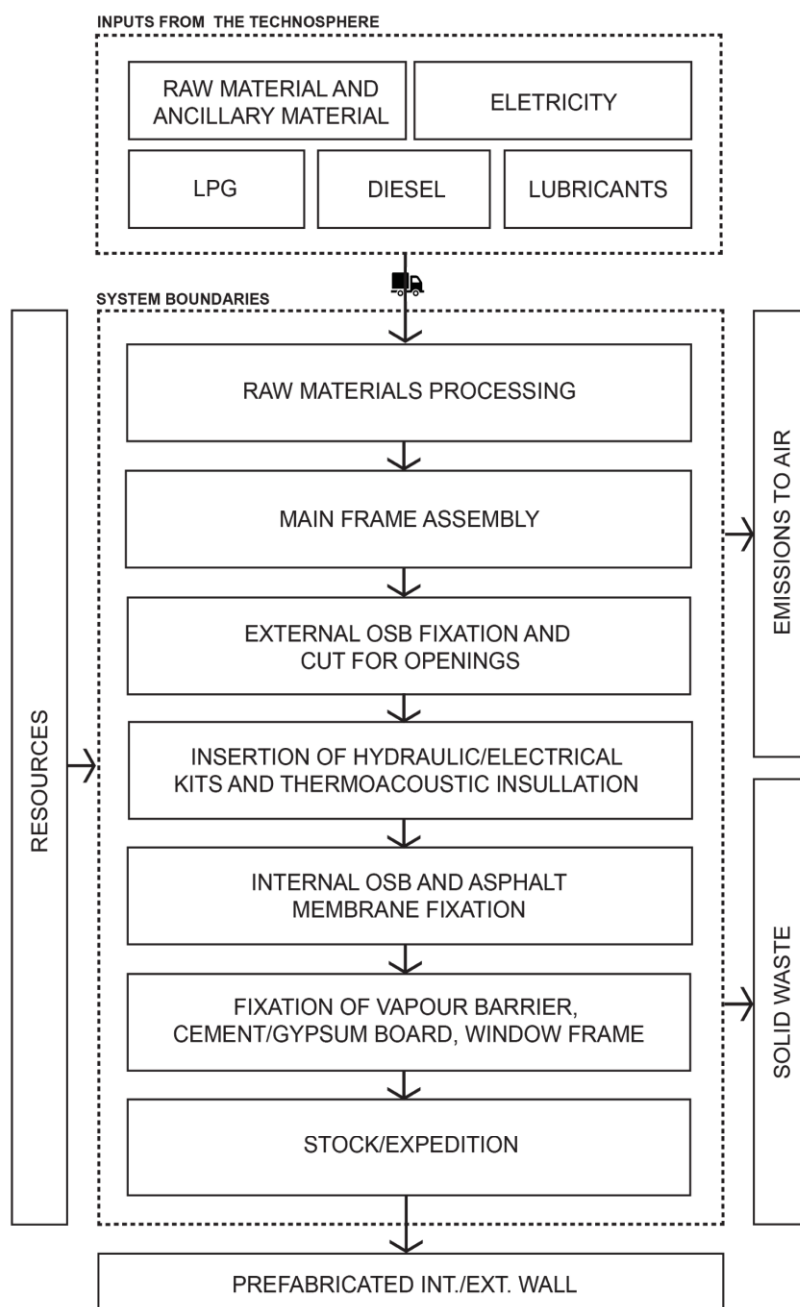
The target audience of this study may include the forest products chain industries and the WF construction market, as well as construction professionals; LCA professionals; and other researchers in the field.

## 6.2.2 DECLARED UNITS AND SYSTEM BOUNDARIES

The study covered the life cycle of Brazilian prefabricated WF walls from a gate-to-gate perspective, that is, from raw and ancillary materials entry in the factory, up to delivery of the walls at the factory gate. Raw/ ancillary material transportation is also reported, however separately. FIGURE C 2 indicates the system boundaries of the study.

A functional unit (FU) is defined as the quantified performance of a product system for use as a reference unit (ISO, 2006a). It is important to note that not all systems have clear or unique functional units. For unspecific products, or when it is not possible to express the function of the product, the reference unit or flow for the analysis can be expressed as “declared unit” (ILCD, 2010). Two declared units are reported in this study, represented by 1 m<sup>2</sup> average external wall element and 1 m<sup>2</sup> average internal wall element, thus, representing two products. This strategy was chosen due to the different composition between outer and inner WF wall elements commonly applied by the company in Brazil, and according to the system delivered by the factory under study. The units were chosen in order to represent typical internal and external wall elements area that compose a residential WF building. Since the analysis in this study does not cover the product use stage in the building, no service life is assigned.

FIGURE C 2: SYSTEM BOUNDARIES AND PROCESS FLOW OF THE WOOD-FRAMED WALL LIFE-CYCLE PRODUCTION SYSTEM UNDER STUDY (GATE-TO-GATE PERSPECTIVE).



Source: the authors (2020).

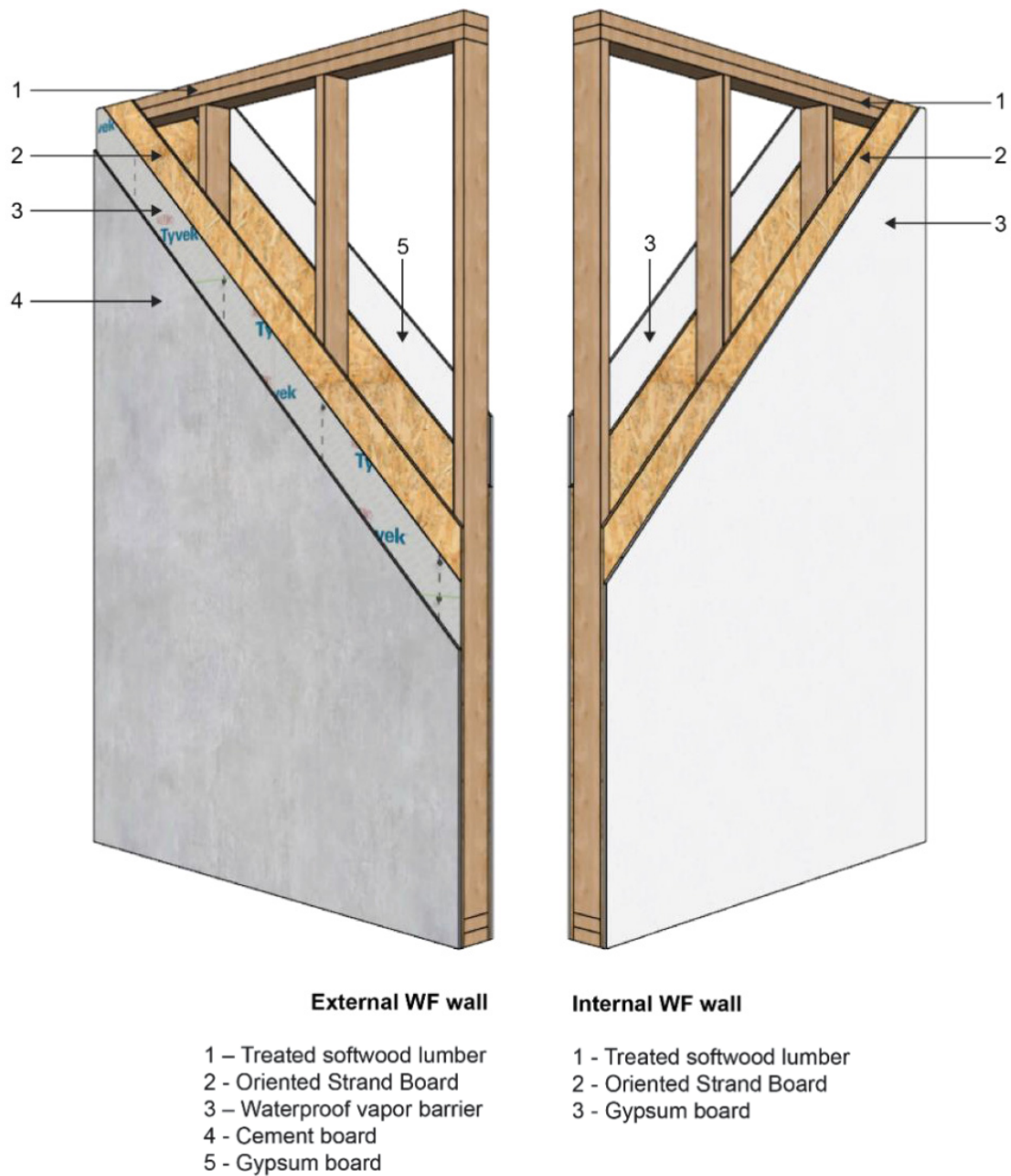
### 6.2.3 Description of the product under assessment

The company applies a characteristic system in its buildings. Softwood timber and OSB panels form the main structural system. Kiln dried and treated softwood timber from *Pinus* spp. is commonly used in the main frame, and OSB panels are applied on its both sides. Due to hot and humid climate of the country, structural timber receives preservative treatment so that it is resistant to xylophagous organisms attack, thus increasing its durability.

The external sheathing components consist of OSB panels along with cementitious boards as external coating. For internal sheathing, OSB and a gypsum board coating is applied. Even though in most cases OSB application on one side of the frame would be enough from a structural perspective, in Brazil, the panels are applied on both sides for cultural reasons, in order to promote a higher performance associated to the building user's feeling. Brazilians got used to being inside a robust masonry structure, which gives a feeling of high solidity of the building. Therefore, to prevent the lightness characteristic of the system from becoming a barrier to its consolidation, it was agreed to apply OSB on both sides of the frame, because of the feeling of greater solidity of the system under the user's perception.

Thermo-acoustic insulation is usually applied in semi-detached walls of different apartment dorms, being that rock wool or glass wool are commonly used. In order to guarantee water-tightness to the system, a waterproof vapor barrier membrane is applied. As for finishing, mortar coating with paint and texture can be applied. FIGURE C 3 illustrates the characteristic internal and external wall assemblies.

FIGURE C 3: CHARACTERISTIC INTERNAL AND EXTERNAL WALL ASSEMBLIES UNDER STUDY.



Source: The authors (2020)

Note:

- metal fixations put the system together;
- for wet areas, consider moisture resistant gypsum board;
- rock or glass wool are applied amongst the main frame for insulation where necessary;
- asphalt membrane wraps the base of ground floor walls.



#### 6.2.4 Description of the system under study

The company applies an automated industrialized method of WF walls prefabrication. The production process is divided into a main line and auxiliary substations. FIGURE C 2 also indicates the processes involved in wall assembly industrial production.

**Raw materials processing:** raw materials<sup>1</sup> processing or the execution of particular wall constructive details occur at auxiliary substations before their application in the wall assemblies. The auxiliary substations are: timber cutting station, panels cutting station (OSB and gypsum board), cement board cutting station, electrical kits station, hydraulic kits station, window metal frame processing station;

**Main frame assembly:** this process starts the wood-framed walls production on the main line with the timber frame assembly. In this stage, the top and bottom frame plates are manually positioned as the studs are placed and fixed in an automated way by a machine, according to the structural design. Framing containing openings, i.e. windows, doors, which need a particular frame disposition, are manually assembled in an auxiliary station next to the main line and are conventionally positioned during the automated wall assembly production;

**External OSB fixation and cut for openings:** in this process, OSB panels are fastened to the studs on the external side of the wall, and then cut for openings, such as electrical hoses and windows, occurs. Such openings, depending on the complexity and need for precision, are performed by a CNC machine or by a manual router machine.

**Internal systems/materials insertion:** in this stage, the panel is rotated 180° by a butterfly table, and then the hydraulic, electrical kits are installed and the thermoacoustic insulation is inserted into the wall, when necessary;

**Internal OSB fixation and cut for openings:** OSB panels are positioned on the internal side of the wall. The wall is then transported to the next station, where the OSB panel is fixed and cut to openings on the inside. In this station, an insulating asphalt membrane is applied on the base of ground floor walls. Here, it is also

---

<sup>1</sup> In this study, raw materials refer to the woody materials that make up the wood framed wall assemblies – treated softwood timber and OSB.

possible to apply gypsum board on the internal side of the wall. It should be noted, however, that the gypsum boards which will be exposed inside the building are usually not installed at the factory, due to possible damage during transportation and assembly.

**External sheathing fixation:** then, fixation of the waterproof vapor barrier, window frames, cement board occur, as well as the application of polyurethane mastic and sealing tape around the frames is carried on;

**Storage/ expedition:** the finished panels are lifted and either stored in a pile or placed on a truck, which transports them to a warehouse or directly to the construction site.

Some complex construction elements, such as stairs, floors, hydraulic installations for toilet and kitchen, are carried out at a separate station, where the processes are less automated. This is done in order to guarantee the necessary precision, without compromising the productivity of the main production line.

#### 6.2.5 Data quality and simplifications

The data quality for the LCI is an important issue to be addressed in an LCA study (FERRO *et al.*, 2018). According to ISO 14040 and 14044 (2006) standards, data quality description, i.e. data collection and calculation procedures, are important to understand the reliability of the study results and to interpret them properly.

High-quality data is essential to make a reliable evaluation in an LCA analysis, and this step requires a lot of time and effort. Characteristic primary data should be considered in order to obtain more accurate and representative environmental results in an LCA (FERRO *et al.*, 2018). In this study, only primary data were managed for the foreground system. Data were obtained by on-site measurements, factory records and design plans.

Inventory data covering 2019 average production of prefabricated WF internal and external wall were applied to conduct this study. Collected data were treated in order to report the LCI for the production of internal and external prefabricated wall assemblies based on mass weighted averages from 10 different projects produced in the manufacturing site during 2019. All projects represent residential housing among apartment buildings (6 projects, 736 housing units) and detached houses (4 projects, and 240 housing units).

Considered inputs were: raw material (wood-based materials), ancillary materials and energy resources. Raw materials are represented by treated softwood timber and OSB panels. Ancillary materials include gypsum board; cement board, waterproof vapor barrier and metal fixations.

Other materials are also applied to the wall system under study. Thermo-acoustic insulation, i.e. glass/rock wool, is usually applied in semi-detached walls of different apartment dorms, yet, since it is not a standard process - present in only 10-15% of the walls according to 2019 data - this material was not considered in the FU. A waterproof asphalt membrane is also applied in the factory in order to wrap the wall base up to a height of 200 mm on both sides, however, this piece of material was not considered in the FU composition because its application is manual and occurs only on ground floor walls. Also, other elements that compose the wall system are only installed on the construction site, i.e. *in loco* waterproofing, joint treatment, coatings and finishes application, and, thence, were not considered as well.

Raw material production inventories are not reported in this study. Only the transportation of these entries is reported, albeit separately. Infrastructure processes, such as those associated production of machinery, means of transportation, and other equipment used in production processes, were not included as well.

Energy resources are those transformed into some type of energy used in the process. The energy used in activities parallel to production, such as in offices for administrative activities and air conditioning, were excluded from the energy consumption of the prefabricated wall production. For the same reason, and since water is not used in the prefabrication process, it is not reported as well.

The outputs considered were: products, residues and CO<sub>2</sub> emissions to air. Even though the studied factory also produces other building subsystems, i.e. inter-floors, roof structure and special panels, only internal and external prefabricated walls compose the considered products in this study. Residues are represented by solid material discarded, sold as scrap or landfilled were considered residues. CO<sub>2</sub> emissions are those arising from the use of fossil fuels within the process (internal transport or energy production) and also those related to transportation. No output emissions to water were reported in this study.

### 6.2.6 Allocation procedures

All inputs and outputs have been calculated and allocated to the declared units considered on this study – 1 m<sup>2</sup> of prefabricated WF internal wall and 1 m<sup>2</sup> of prefabricated WF external wall. The factory also produces other subsystems needed to build a WF building, such as floor and roof framing, stair structures, and thence, mass allocation was applied to distribute aggregated inputs, such as energy resources to the wall elements produced in the automated line.

The following steps were applied for allocation:

- inputs used in the automated wall production line were selected from material spreadsheets of each project executed in 2019;
- process material residues were calculated according to factors informed by the company;
- only the portion of the projects produced in 2019 was considered for the inventory (this data was by production dashboards);

In order to obtain inventory for internal and external walls, the produced amount of each wall type - internal and external - was calculated based on project floor plans in order to find proportion factor between internal and external walls in each project, and then internal and external wall production factors for the company as a whole. Accordingly, area weighted average was used allocate inputs to the different types of walls, considering the material specificity of each wall type.

## 6.3 LIFE CYCLE INVENTORIES

In this section, inventory data covering 2019 average production data of prefabricated WF internal and external wall are presented. Energy, emissions and transportation considerations in inventory development are also presented.

### 6.3.1 Energy use and associated emissions

Electricity is the main energy resource used in the WF walls prefabrication process under study. The main CO<sub>2</sub> emission release due to electricity use in product manufacture is in electricity production. Thence, the CO<sub>2</sub> emissions contribution in

electricity production was calculated based on the method presented in Tavares and Bragança (2016), which is based on the energy mix presented in the Brazilian National Energy Balance and IPCC CO<sub>2</sub> emission factors per energy source, as presented in TABLE C 1.

TABLE C 1: CO<sub>2</sub> EMISSIONS FOR BRAZILIAN THERMOELECTRICITY PRODUCTION

Brazilian Thermoelectricity Energy Mix1		Fuel Efficiency2	Factor3	%	Emission factor4 (kgCO2 GJ-1)	Emission contribution in electricity production (kgCO2 GJ-1)
Coal	3.7	0.2	5.0	18.50	94.6	17.50
Oil	1.9	0.3	3.3	6.33	74.1	4.69
Natural gas	8.6	0.7	1.4	12.29	56.1	6.89
TOTAL						29.09

Source: The authors (2020)

<sup>1</sup>Fossil resources in Brazilian electricity production in 2019 EPE (2019);

<sup>2</sup>Fuel efficiency from Tavares and Bragança (2016);

<sup>3</sup>Factor based on fuel efficiency in order to quantify the amount of fuel used to generate the respective contribution to the referred energy mix;

<sup>4</sup> CO<sub>2</sub> emission factors per energy source from IPCC (2006).

In order to calculate the CO<sub>2</sub> emissions for Brazilian thermoelectricity production, the electricity supply by energy source was taken from the National Energy Balance – base year 2018 (EPE, 2019), with the respective contribution percentages by energy source. Fuel efficiency factors were applied as suggested in Tavares and Bragança (2016). Fuel sources CO<sub>2</sub> emission factors were applied, according to IPCC (2006), in order to calculate a representative CO<sub>2</sub> emission factor associated to electricity consumption. Contributions by energy sources as hydro, wind, solar, nuclear, and biomass to electricity production were considered renewable.

Although the studied region is surrounded by hydro powerplants, it is not appropriate to calculate the energy mix regionally because the electricity production system in Brazil is integrated for all regions. Also, there are seasonal generation conditions which interfere in the electricity production mix in the country (i.e. in the Summer, we use all thermal energy sources, while in the Winter not).

For other energy sources used in factory production, fossil fuels CO<sub>2</sub> emission factors were also taken from IPCC (2006). In Brazil, diesel oil takes a share of biodiesel in its composition, and hence, for this study, the biodiesel proportion of

11% in diesel oil was assumed for 2019 based on historical proportion data by the National Oil Agency – ANP (ANP, 2020). Brazilian biodiesel CO<sub>2</sub> emission factors was taken from (MMA, 2014) and were assumed to be biogenic.

### 6.3.2 Transportation burdens

Transportation activities involve road and maritime modes in the studied process. Average transport distances corresponding to the inputs' delivery up to the factory entrance gate were calculated from supply information provided by the factory, and are presented separately in TABLE C 2. For transportation of woody materials, two-way delivery distances were considered, assuming that trucks come back empty after delivery. For transportation of the other material and fuel inputs, the one-way delivery distance was considered.

TABLE C 2: TRANSPORTATION DISTANCES

Materials	Transportation mode	Distance (km)
Softwood lumber	road	315
Oriented Strand Board	road	213
Gypsum board	road	307
Cement board	road	392
Vapor barrier	<sup>1</sup> ship	9175
	road	474
Metal fixations	<sup>2</sup> ship	9675
	road	158

Source: The authors (2020)

<sup>1</sup>Vapour barrier is imported from the USA;

<sup>2</sup>Part of metal fixations are imported from Italy.

For road transportation, it was assumed that transport activities were performed by medium trucks, with a payload between 10 and 15 tons. Fuel consumption factors and average pollutants emission factors from characteristic Brazilian data for fleets from 2000-2012<sup>2</sup> were obtained from the 2013 Brazilian Motor Vehicle Air Pollution Control Program (MMA, 2014). For maritime transportation emissions, it was assumed that transport activities were performed by

---

<sup>2</sup> 2000-2012 fleet was the latest available update.

an average general cargo ship by the UK Government Conversion Factors for greenhouse gas (GHG) reporting (DEFRA, 2019).

### 6.3.3 Prefabricated WF walls LCI

As previously stated, this study considers two declared units for the WF prefabricated walls production analysis. The global inventory data (gate-to-gate perspective) per 1 m<sup>2</sup> of WF external and internal walls at factory gate are presented in TABLE C 3 and TABLE C 4, respectively.

It is possible to notice differences between external and internal walls concerning material inputs. This happens due to the fact that external walls have to perform a sealing function, thence taking additional elements as the vapor barrier and cement board (as shown in FIGURE C 3). Gypsum board is applied on both side of internal walls, in contrast to the one-side application in external walls, explaining the difference in gypsum board inputs between the wall types as well.

Since mass allocation was adopted in this study, material inputs differences also affect other inventory inputs and outputs, as energy resources and solid waste residues. Material input differences usually cause external walls to be heavier than internal walls, because external walls usually take a cementitious material whose density is way higher than the other main raw material inputs.

Electricity consumption for the production of external and internal prefabricated wood-framed walls is 0.73 kWh m<sup>-2</sup> and 0.71 kWh m<sup>-2</sup>, respectively. These values differ due to the mass allocation strategy, since the constitution of the walls is different, and more energy is required in order to process and transport external walls through the process. Yet, no significant difference can be noticed among the other energy resources applied in the process - as diesel, LPG and lubricants - since their participation is minor in terms of energy consumption. Even though the effect of allocation of diesel, LPG and lubricants consumption for internal and external production exists, it is too slight and can be considered minimal to be expressed in this inventory in this declared unit basis.

Due to the same reason, ancillary materials are mainly allocated to external walls, what makes sense, considering that they can be more robust than internal walls, and may require more metal fixations due to the vapor barrier fixation and also the greater fixtures demand of the cementitious board against gypsum board.



TABLE C 3: GLOBAL INVENTORY DATA (GATE-TO-GATE PERSPECTIVE) PER DECLARED UNIT (1 M<sup>2</sup> OF PREFABRICATED WOOD FRAME EXTERNAL WALL AT FACTORY GATE).

	Quantity	Unit
<b>INPUTS FROM TECHNOSPHERE</b>		
Materials		
Softwood lumber	0.018	m <sup>3</sup>
OSB	1.521	m <sup>2</sup>
Gypsum board	0.281	m <sup>2</sup>
Cement board	0.680	m <sup>2</sup>
Vapor barrier	0.967	m <sup>2</sup>
Metal fixations	0.594	kg
Fossil Fuels		
Diesel oil	0.012	l
LPG	0.027	kg
Lubricants	0.00014	l
Energy		
Electricity	0.73	kWh
<b>OUTPUTS TO TECHNOSPHERE</b>		
Product		
External wall	1.0	m <sup>2</sup>
Waste to treatment		
Softwood lumber	0.0041	m <sup>3</sup>
Oriented Strand Board	0.073	m <sup>2</sup>
Gypsum board	0.015	m <sup>2</sup>
Cement board	0.032	m <sup>2</sup>
Vapor barrier	0.088	m <sup>2</sup>
Metal fixations	0.119	kg
<b>OUTPUTS TO THE ENVIRONMENT</b>		
Emissions into air		
CO <sub>2</sub> fossil - process	0.182	kg
CO <sub>2</sub> bio - process	0.003	kg
CO <sub>2</sub> fossil - transport	0.299	kg
CO <sub>2</sub> bio - transport	0.034	kg

Source: The authors (2020)

TABLE C 4: GLOBAL INVENTORY DATA (GATE-TO-GATE PERSPECTIVE) PER DECLARED UNIT (1 M<sup>2</sup> OF PREFABRICATED WF INTERNAL WALL AT FACTORY GATE).

	Quantity	Unit
<b>INPUTS FROM TECHNOSPHERE</b>		
Materials		
Softwood timber	0.018	m <sup>3</sup>
OSB	1.409	m <sup>2</sup>
Gypsum board	0.616	m <sup>2</sup>
Metal fixations	0.135	kg
Fossil Fuels		
Diesel oil	0.012	l
LPG	0.026	kg
Lubricants	0.00014	l
Energy		
Electricity	0.71	kWh
<b>OUTPUTS TO TECHNOSPHERE</b>		
Product		
Internal wall	1.0	m <sup>2</sup>
Waste to treatment		
Softwood timber	0.0039	m <sup>3</sup>
OSB	0.068	m <sup>2</sup>
Gypsum board	0.032	m <sup>2</sup>
Metal fixations	0.015	kg
<b>OUTPUTS TO THE ENVIRONMENT</b>		
Emissions into air		
CO <sub>2</sub> fossil - process	0.178	kg
CO <sub>2</sub> bio - process	0.003	kg
CO <sub>2</sub> fossil - transport	0.293	kg
CO <sub>2</sub> bio - transport	0.033	kg

Source: The authors (2020)

It is also possible to note that although the declared unit is 1 m<sup>2</sup> of external/internal prefabricated WF wall, some raw materials which would be expected to have at least the same area of input quantity for the declared unit (see definitions in 2.3), resulted in less than 1 m<sup>2</sup>. This happens because we report here the industrial production of prefabricated WF walls, which is followed by an installation in the construction site.

The main variation can be observed in the gypsum input in the external and internal wall inputs. This happens because the gypsum board which will be exposed inside the building is usually not installed at the factory, due to possible damage during transportation and assembly. For single-story buildings which take only one layer of gypsum board, for example, it is common that all the gypsum coating is installed in the construction site. On the other hand, for multi-story building projects which take two gypsum board layers for fire protection, one board layer is installed at the factory and the other at the construction site.

Regarding cement boards, what happens is that usually in wall corners, where there is a connection with another wall, the wall is sent to the construction site without cementitious board, and there it is applied. These constructive strategies affect, thus, the factory gate-to-gate inputs of materials in comparison to the final wall.

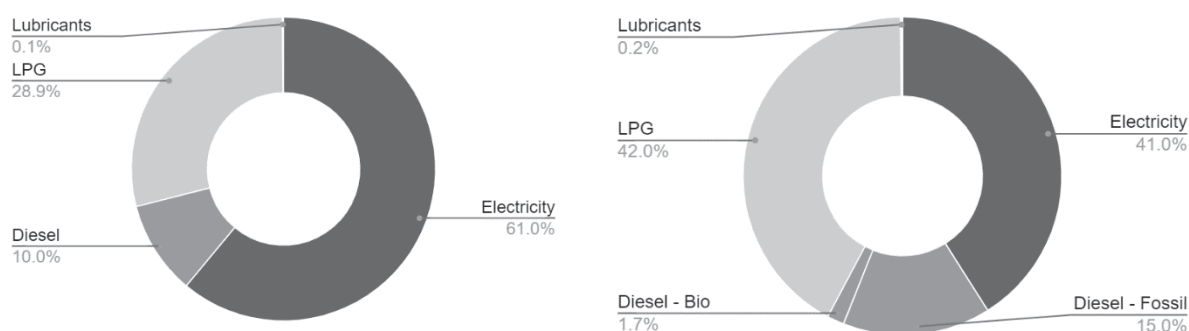
#### 6.3.4 Process primary energy consumption and associated CO<sub>2</sub> emissions

Energy for the prefabricated walls production comes from electricity, diesel, LPG and lubricants, as indicated TABLE C 2 and TABLE C 3. The main energy source is electricity, used in the automated wall production line as well as in the auxiliary equipment (brooch, routers, cutting equipment, among others). Diesel fuel use is used by the crane primarily to lift the finished systems to the storage or to the transport truck. LPG is used for forklift operation. Lubricants are consumed in the automated wall production equipment, and also in the crane.

The total 2019 on-site wall prefabrication process energy demand was 578991.43 MJ, from which more than half represented by electricity (61.05%). The associated CO<sub>2</sub> process emissions are 25072.66 kgCO<sub>2</sub>, predominantly due to electricity consumption (41.01%). On average, energy consumption for prefabricated WF walls production is 4.23 MJ m<sup>-2</sup> (4,18 and 0,05 MJ m<sup>-2</sup> from fossil and renewable

resources respectively), including all energy sources used in gate-to-gate production. This energy consumption is associated to an average emission of  $0.18 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-2}$  of prefabricated wall. FIGURE C 4 illustrates process energy use and associated  $\text{CO}_2$  emissions contributions in prefabricated WF wall production. In order to find this process average energy consumption and  $\text{CO}_2$  emission, in this particular section, internal and external wall types were not distinguished.

FIGURE C 4: PROCESS ENERGY USE AND ASSOCIATED  $\text{CO}_2$  EMISSIONS



Source: The authors (2020)

It is possible to note, in FIGURE C 4, the clear distinction in emission factors of the energy resources used in the process, pointing out the energy-source composition in the Brazilian energy mix. Despite the higher consumption of electricity in the process, emissions associated with the use of electricity have proportionately less contribution due to the higher  $\text{CO}_2$  emission factors of fossil fuels. It is worth mentioning that this can be a particularity of the country, emphasizing that countries with a predominant participation of fossil fuels in their energy mix, should present a different picture for essentially electricity-based processes.

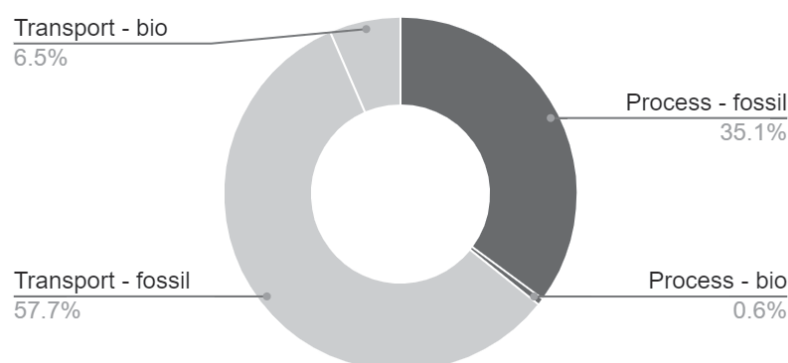
If the transport energy is considered, it adds an approximate contribution of  $9.27 \text{ MJ m}^{-2}$ , and these associated to  $0.33 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-2}$  of carbon emissions, thus, totalizing  $13.51 \text{ MJ m}^{-2}$  and  $0.51 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-2}$  for the production of an average prefabricated WF wall.

### 6.3.5 Process x transportation associated $\text{CO}_2$ emissions

As shown in FIGURE C 5 raw material transportation represents 64.3% of total  $\text{CO}_2$  emissions, and thence should be considered representative for the process under study. The great contribution of transportation to  $\text{CO}_2$  emissions also leads to a discussion to whether WF wall prefabrication in Brazil should be considered low-

emission, and hence, there are two important topics to be pointed out: 1) as previously shown, the most important energy resource applied in the prefabrication process is Brazilian electricity, which carries carbon emissions burdens from fossil sources in its mix; 2) Brazilian goods transportation is essentially through road, bringing heavy carbon emission burdens due to the fossil fuel consumption this transportation mode.

FIGURE C 5: TRANSPORTATION AND PROCESS ASSOCIATED CO<sub>2</sub> EMISSIONS



Source: The authors (2020)

It should be pointed out, however, that only the transportation of raw materials to the factory entrance gate is considered here. In terms of the contribution among other processes until the whole building conclusion, for example, prefabricated walls transportation to the construction site, as well as raw and ancillary materials applied in construction should be further considered.

### 6.3.6 CARBON STORAGE

Carbon dioxide from the atmosphere is stored to trees through photosynthesis and this carbon dioxide is stored in wood in the form of carbon. Lippke et al. (2010) state that the C stored in wooden products can be considered a complement to the C stored in the forest, and that it represents an increasing C stock, which only decreases through the products that reached the end of its useful life.

Carbon balance is still discussed due to the product use and end-of-life uncertainty. However, looking only at the substitution aspects when comparing materials for equivalent uses in LCA of building materials, not including the C stored in wood products, hides the many advantages of the use of wood as a material, and thus opportunities for reducing current CO<sub>2</sub> emissions in CI (LIPPKE et al., 2004).

An average m<sup>2</sup> of external/ internal prefabricated WF wall keeps around 6.7kg of softwood timber and 7.7 kg of OSB. IPCC (2019) suggests a default carbon content of 50% for softwood timber and 46.3% for OSB. Considering this default, it is possible to estimate the biogenic CO<sub>2</sub> storage, as shown in eq.1.

$$\text{Biogenic carbon storage in wood} = \frac{44}{12} * \text{TC} * \text{dry mass of wood}$$

(eq. 1)

In which:

44 is the molar mass of carbon dioxide;

12 is the molar mass of carbon;

TC is the carbon content in wood.

Thus, on average 25.4 kg of biogenic carbon could be stored in 1 m<sup>2</sup> of standard prefabricated WF wall under study during the building life-cycle, expected to be more than 50 years. This study inventory shows that 0.518 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> and 0.507 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> is emitted in the industrial prefabrication process of 1 m<sup>2</sup> external and internal WF prefabricated wall, respectively (considering process and transport emissions). Even though in this paper raw material production CO<sub>2</sub> emissions are not included, it is possible to note that the WF wall prefabrication phase does not significantly contribute to carbon emissions, representing, in worst case scenario - external wall production - less than 2% of the CO<sub>2</sub> storage potential of the product under study.

## 6.4 DISCUSSION

Considering the results found in the present study, in terms of geographic reality approximation, a study which could be used as a basis for comparison is by Monich (2012), who found a contribution of 2.96 MJ m<sup>-2</sup> of embodied energy in the prefabrication process of a WF whole building. The process analyzed by Monich (2012) did not involve an automated WF wall production line, and is provided in terms of building area, what turns the comparison with the results found herein difficult. Notwithstanding, the author conclusion have similarities with the present study. Monich (2012) emphasizes that the prefabrication process in the factory adds very little in terms of embodied energy of the whole building production process since raw material processing, being that the major contributor is the electricity used in the factory.

Still regarding energy consumption, the results found in the present study also have similarities with an EPD Prefabricated Light WF Open Wall (QWEB, 2019) which reports an energy consumption  $764 \text{ MJ m}^{-3}$  of prefabricated open wall in its prefabrication process. Considering the mass/ $\text{m}^3$  information provided in the EPD and the approximation to a mass basis of the wall reported in the present study, the EPD results represent an approximate energy demand of  $16 \text{ MJ m}^{-2}$  of prefabricated wall, which brings evidence of a coherent correlation with the result found herein, in terms of magnitude.

As far as the authors are concerned, studies which bring results focused on the prefabrication process of WF walls are not common. It is common to see LCA studies of WF framed buildings which consider a cradle-to-gate boundary (ACHENBACH, WENKER AND RÜTER, 2018; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2012; MALONE et al., 2014; SALAZAR AND MEIL, 2009), considering or not the prefabrication phase. Less frequently addressed are the end-of-life of the materials that compose the WF buildings, as Diyamandogiu and Fortuna (2015) and Padilla-Rivera, Amor and Blanchet (2018) do. Some also focus on the operational phase of the building, as in Kildsgaard et al. (2013). Therefore, studies usually report prefabrication result along with other phases of the WF building life cycle.

Focused on the prefabrication phase, the study by Achenbach, Wenker and Rüter (2018) evaluated the stage of industrial assembly and construction of wooden houses, pointing out that in the prefabrication of building elements, transportation and construction site activities may be responsible for a significant contribution of approximately 30% to the Global Warming Potential (GWP). Despite the authors conclusions, it should be noted that the inclusion of transportation pot-prefabrication may have a great contribution to the impacts, thus, in accordance with the exposed in the present study.

It should be emphasized, however, that making comparisons between this study and previous studies is something sensitive and sometimes difficult due to differences in system boundaries, and goals and scope of the studies.

There were some limitations found in the development of this study. Even though it is focused on the WF walls prefabrication process, the inclusion of all materials production processes burdens could have made the contribution of prefabrication to all the embodied energy and  $\text{CO}_2$  emission easier to identify, besides providing more conditions to comparison to other studies. In addition, in

order to have a broader picture of the prefabrication contribution in the pre-operational phase of a building, as presented in Achenbach, Wenker and Rüter (2018), post-prefabrication transportation and construction site activities could be included.

The fact that a whole year production was included in this inventory brought some difficulties due to differences in project types and specificities in building strategies adopted by the company. As stated earlier, according to each project, some material is installed in the factory or in the construction site, affecting the global inventory data. Thus, considering a specific project (or many repetitions of one single project type) for a complete analysis would be an interesting strategy to generate prefabricated WF building construction LCA data.

Also, there are structural and constructive distinctions between single family and multifamily WF building in Brazil, and in this study, they were either conventioned not to be included in the analysis, or considered minor. Even though it can be a particular reality of our country, for a more detailed and accurate analysis, these two types of buildings could be analyzed separately.

Likewise, we suggest that LCIs for other systems that compose a building – as roofing and flooring - be generated. This could help generate robust LCA analysis of complete WF buildings. However, in this study they were not considered given their variability among the different projects of a whole-year production, and thus, not included in the scope.

Considering the use of the generated data in the life cycle of buildings, we believe the distinction between the product and construction phase in case of prefabricated buildings can be confusing. Should a prefabrication be considered in element be considered in product (A1-A3) or construction (A4-A5) stage? This questioning may cause doubts even when defining system boundaries of studies of this nature, consequently causing a variability in the results reported in the studies. Even though there are comparability limitations among LCA studies, considering it is a standardized assessment tool, issues like these should be better defined mainly for evaluating the life-cycle of complex object as buildings, thence avoiding mistakes while taking secondary data.

Regarding the inclusion (or not) of the construction stage in LCAs, even knowing that it can be complex and variable, it is understood that not including this stage in the evaluation fails to explore important characteristics of industrialized



systems, such as the WF, as data such as waste generation, manpower and energy demand are not analyzed for this stage and could be important data for decision making when compared to non-industrialized systems. Thus, we believe that this chain must be continuously evaluated and managed based on scientific data generated in a standardized way, through LCA.

## 6.5 CONCLUSION

Detailed embodied energy and CO<sub>2</sub> emissions inventory of external and internal prefabricated WF walls production was generated in this study. Results indicated embodied energy of 4.23 MJ m<sup>-2</sup> and 0.18 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> for the prefabrication of an average WF wall. Raw material transportation seems to have important contribution in emissions of the analyzed process. Results shown in this study have similarities with other in terms of the minor contribution of prefabrication in the WF building process.

The gate-to-gate LCIs presented here is part of contribution to the national database of Life Cycle Inventories - SICV Brasil and is the first to profile prefabricated WF walls production in Brazil. The results presented here point to the same general trend present among wood products, that wood-based products manufacturing consumes significantly less energy than the manufacturing of non-wood alternatives.

Buildings life cycles are complex study objects since they involve the use of many materials, are susceptible to change and require maintenance, which often makes the development of LCAs more complex and requires the use of average or even estimated data. In addition, LCI development require intense data collection and availability, and thus, we believe that this study contributes to the continuous evaluation of the WF product chain, and specially contribute with information about the WF construction system in Brazil.

## DISCLAIMER

Data from research project MCTIC / CNPq Call No. 40/2018 - entitled " Wood Frame Construction System Life Cycle Inventory Development", were partially used to obtain the results presented herein.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support for this study was provided by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). The authors also thank the Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) for supporting this research by means of involved faculty and local infrastructure.

## REFERENCES

- ACHENBACH H, DIEDERICHS SK, WENKER JL, RÜTER S (2016) Environmental product declarations in accordance with EN 15804 and EN 16485 — How to account for primary energy of secondary resources? **Environmental Impact assessment Review**. 60, 134-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2016.04.004>
- ACHENBACH H, WENKER JL, RÜTER S (2018) Life cycle assessment of product- and construction stage of prefabricated timber houses: a sector representative approach for Germany according to EN 15804, EN 15978 and EN 16485. *Eur. J. Wood and Wood Prod.* 76(2), 711–729. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1236-1>.
- ANP – Available at: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>. Accessed in Apr. 2020.
- Araújo V A, Cortez-Barbosa J, Garcia J N, Gava M, Laroca C and César S F 2016 **Rev. de la construcción** 15 78-87.
- AWC - American Wood Council; American Forest & Paper Association (AF&PA) (EUA). **Details for Conventional Wood Frame Construction**. Washington. AWC. 2001. 52 p.
- BERGMAN, Richard et al. The carbon impacts of wood products. **Forest Products Journal**, USA, v. 64, n. 7, p.320-332, out. 2014.
- BERGMAN, R. D.; KAESTNER, D.; TAYLOR, A. M. Life Cycle Impacts of North American Wood. **Wood and Fiber Science**, 2016.
- BERGMAN, R. D.; KAESTNER, D.; TAYLOR, A. M. Life Cycle Impacts of North American Wood. **Wood and Fiber Science**, 2016.

BRIBIÁN IZ, USÓN A, SCARPELLINI S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, n.44, p. 2510-2520. 2009.

BUYLE M, BRAET J, AUDENAERT A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**., n.26, p. 379-388. 2013.

CEN, **EN 15978** - Sustainability of Construction Works - Assessment of Environmental Performance of Buildings - Calculation Method. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2019**: Ano base 2018. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

GARCIA, Katia Regina Punhagui. **Potencial de redução de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera**. 2014. 422 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio Ambiente En La Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluna, Universidad Politécnica de Cataluna e Universidade de São Paulo, Barcelona, 2014.

GIESEKAM, J.; BARRETT, J.; TAYLOR, P.; OWEN, A. The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. **Energy & Buildings**, v. 78, p. 202–214, 2014. Elsevier B.V. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.035>>.

GONZÁLEZ-GARCÍA, Sara et al. Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 4, p.432-443, 2 fev. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0384-0>.

Guia Qualidata: **Requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida**. Elaborado por Thiago Oliveira Rodrigues, et al. – Brasília: IBICT, 2016.

HAFNER, A.; RÜTER, S. Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings-an exemplary study for residential buildings in Germany. **Wood and Fiber Science**, v. 50, p. 139–154, 2018. Society of Wood Science and Technology.<<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051783039&partnerID=40&md5=952e640fed99509b32a8cb7f06aec102>>.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment - Theory and Practice**. Springer International Publishing, 2018.

IDDON, C. R.; FIRTH, S. K. Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK. **Energy & Buildings**, v. 67, n. 2013, p. 479–488, 2019. Elsevier B.V. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.041>>.

ILCD. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System Handbook** – General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC** - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland, 2006.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC - 2019 Refinement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Volume 4** - Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2019.

**ISO 14040**, 2006a. Environmental Management e Life Cycle Assessment - Principles and Framework. Geneva.

**ISO 14044**, 2006b. Environmental Management e Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. Geneva.

LIPPKE, Bruce et al. CORRIM: Life-cycle Environmental Performance of Renewable Building Materials. **Forest Products**, v. 54, n. 6, jun. 2004.

LOVELL, H.; SMITH, S. J. Agencement in housing markets: The case of the UK construction industry. **Geoforum**, v. 41, n. 3, p. 457–468, 2010. Elsevier Ltd. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.11.015>>.

MALONE BP, GUPTA R, MILLER TH, PUETTMANN ME (2014) Environmental impact assessment of light-frame and timber frame structures. **J. of Green build.** v. 9, n. 2, p. 102–123.

MAO, C.; SHEN, Q.; SHEN, L.; TANG, L. Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. **Energy & Buildings**, v. 66, p. 165–176, 2013. Elsevier B.V. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.033>>.

Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários** 2013. Ano base 2012. MMA. 2014.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema wood frame no estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

NHBC. **Housing Market Report**. N° 298. 2017. 31 p. Disponível em: <[https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707\\_Housing-Market-Report\\_Jul17.pdf](https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707_Housing-Market-Report_Jul17.pdf)>. Accessed in: jul. 2019.

QWEB – Quebec Wood Export Bureau (2019) **Environmental Product declaration for prefabricated light wood frame open wall**. CSA Group. 20 p.

SALAZAR J, MEIL J (2009) Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence. **J. Clean. Prod.** v. 17, n. 17, p.1563-1571.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. D. P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 309–326, 2018.

ŠVAJLENKA, JOZEF; KOZLOVSKÁ, M. Evaluation of the efficiency and sustainability of timber-based construction. **Journal of Cleaner Production**. v. 259, 2020.

TAVARES, S. F; BRAGANÇA, L. Índices de CO<sub>2</sub> para materiais de construção em edificações brasileiras. **SBE 16 Brazil e Portugal**, p. 927-936, 2016.

THALLON, R. **Graphic guide to Frame Construction**. 3 ed. Newtown: The Taunton Press, 2008.

DEFRA. UK Government Conversion Factors for greenhouse gas (GHG) reporting. Available on: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2019> (Spreadsheet). Accessed in: Apr. 2020.

WERNER, Frank; RICHTER, Klaus. Wooden building products in comparative LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 7, p.470-479, 17 abr. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.04.317>.

## 7 COMPILAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados obtidos nos artigos 2 e 3 são brevemente reapresentados<sup>1</sup> de forma sistematizada. Em seguida é desenvolvida uma compilação dos resultados de todos os processos avaliados - produção de madeira serrada tratada; produção de OSB; e montagem industrial de vedações verticais internas e externas em WF – para a composição das vedações verticais em WF.

Os quadros e figuras a seguir apresentam os principais resultados obtidos nos artigos 2 e 3, quanto à EE e emissão de CO<sub>2</sub> associadas aos processos produtivos estudados.

O QUADRO 2 apresenta os resultados obtidos no ARTIGO 2 para o processo produtivo de **madeira serrada tratada** incluindo os subsistemas **SS0** e **SS1a** delimitados nesta dissertação.

QUADRO 2: EE e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo produtivo de 1 t seca de madeira serrada tratada.

Subunidade de análise		EE (MJ t <sup>-1</sup> )				Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> t <sup>-1</sup> )			
		Transportes		Processo		Transportes		Processo	
		Fóssil	Ren.	Fóssil	Ren.	Fóssil	Bio	Fóssil	Bio
SS0	Operações florestais	6,14	0,76	56,24	6,95	0,45	0,05	4,12	0,48
SS1a	Produção MS	219,15	27,09	1458,20	6079,09	16,07	1,85	54,58	679,38
TOTAL - MS		225,29	27,85	1514,44	6086,04	16,52	1,91	58,70	679,86
		253,14		7600,48		18,43		738,56	
		7853,62				756,99			
Tratamento		*	*	410	0	*	*	12	0
TOTAL – MS tratada		225,29	27,85	1924,44	6086,04	15,52	1,91	70,7	679,86
		253,14		8010,48		18,43		750,56	
		8263,62				768,99			

FONTE: A autora (2020).

\*Transporte de matéria-prima até a indústria de beneficiamento da madeira não considerado para este subsistema.

A produção de **madeira serrada** indica uma EE de **7853,62 MJ t<sup>-1</sup> (7,85 MJ kg<sup>-1</sup>)** associada a uma emissão de CO<sub>2</sub> de **756,99 kgCO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup> (0,76 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>)**. Acrescentando-se a contribuição do tratamento da madeira de **410 MJ t<sup>-1</sup> (0,41 MJ**

<sup>1</sup> recomenda-se fortemente a leitura dos referidos artigos (CAPÍTULOS 5 e 6) para melhor compreensão da origem dos dados e das etapas subsequentes desta pesquisa.

$\text{kg}^{-1}$ ), a partir de SOUZA (2013), os valores resultam em **8263,62 MJ t<sup>-1</sup>** (**8,26 MJ.kg<sup>-1</sup>**) e **768,99 kgCO<sub>2</sub> t<sup>-1</sup>** (**0,77 kgCO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>**) para a produção de madeira serrada e tratada.

A FIGURA 19 e a FIGURA 20 apresentam as contribuições das fontes energéticas e emissões de CO<sub>2</sub> associadas para a produção de **madeira serrada tratada**. Nota-se a predominância de fontes renováveis de energia no processo produtivo da madeira serrada tratada, associado à energia de biomassa proveniente da queima de resíduos lenhosos, o que faz também com que o perfil energético esteja predominantemente associado a fontes biogênicas de emissões de CO<sub>2</sub>.

FIGURA 19: **EE** PARA A PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA.

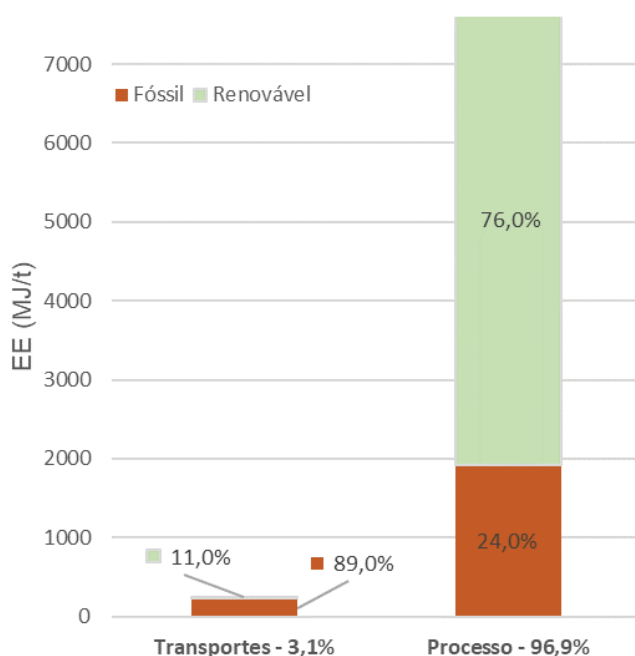
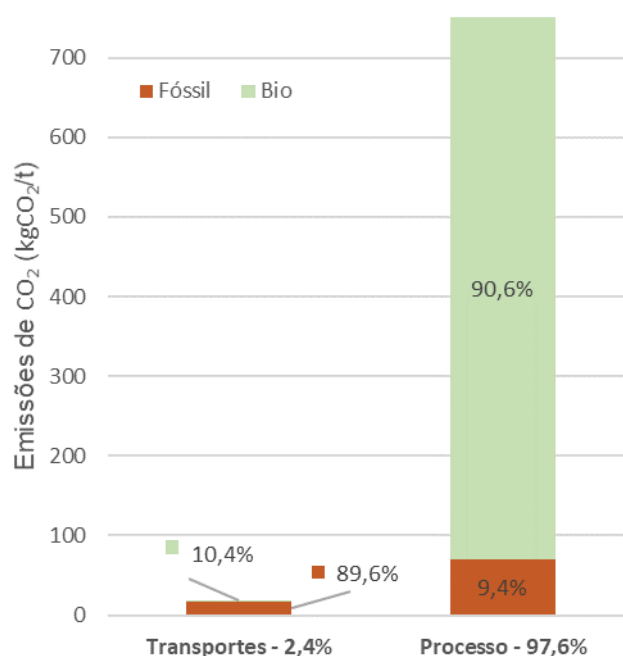


FIGURA 20: EMISSÕES DE **CO<sub>2</sub>** PARA A PRODUÇÃO DE MADEIRA SERRADA.



FONTE: A autora (2020).

Ressalta-se que os dados escolhidos em relação à produção de madeira serrada são referentes ao processo produtivo de madeira de florestas plantadas, sendo que resultados muito divergentes são observados para madeira serra nativa, como exposto por Garcia (2014), não só devido ao elevada geração de resíduos na exploração, como também pela elevada contribuição das cargas de transporte.

O QUADRO 3 apresenta a compilação dos resultados obtidos no ARTIGO 2 para o processo produtivo de **OSB** incluindo os subsistemas **SS0** e **SS1b** delimitados nesta dissertação.



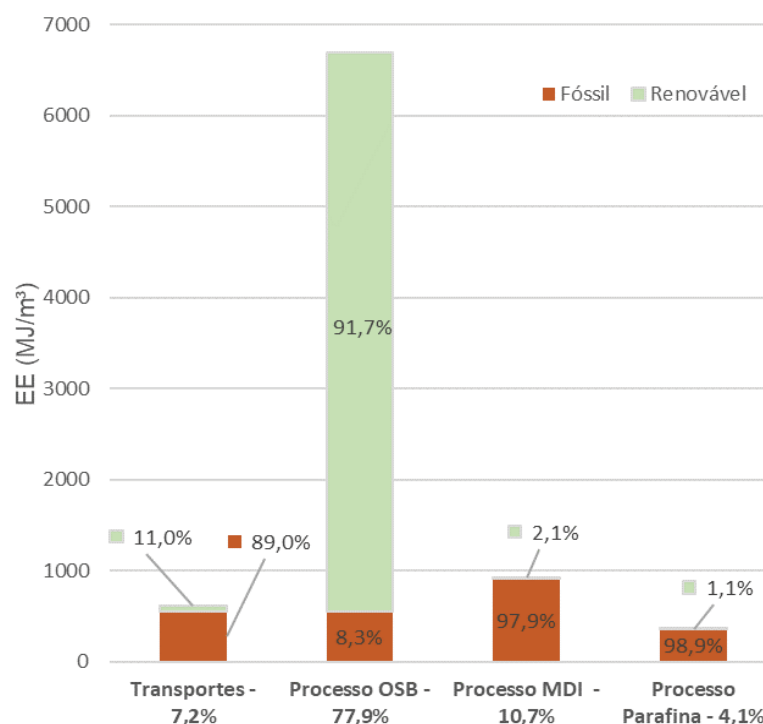
QUADRO 3: EE e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo produtivo de 1 m<sup>3</sup> de OSB.

Subunidade de análise		EE (MJ m <sup>-3</sup> )				Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> )			
		Transportes		Processo		Transportes		Processo	
		Fóssil	Ren.	Fóssil	Ren.	Fóssil	Bio	Fóssil	Bio
SS0	Operações florestais	7,82	0,97	13,16	1,63	0,57	0,07	0,97	0,11
SS1a	Produção OSB	539,61	66,69	542,20	6135,56	39,72	4,44	17,69	686,98
Produção resina MDI		*	*	905,37	19,40	*	*	29,99	0
Produção Parafina		*	*	353,28	3,75	*	*	25,89	0,24
TOTAL - OSB		547,44	67,66	1814,02	6160,34	40,29	4,50	74,53	687,33
		615,10		7974,36		44,79		761,86	
		8589,46				806,65			

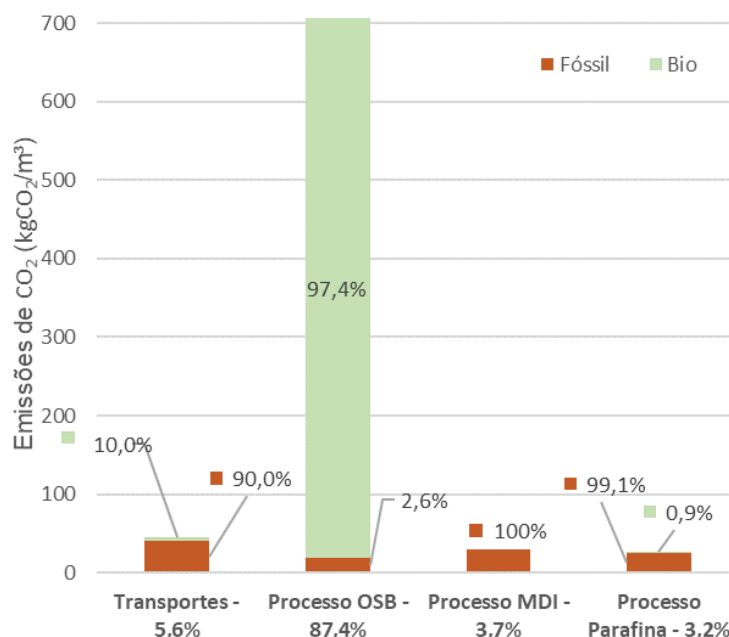
FONTE: A autora (2020).

\* A EPD - ISOPA (2011) - de origem dos dados não inclui e não informa dados de transporte de matéria-prima para o a produção da resina MDI.

A FIGURA 21 e a FIGURA 22 apresentam as contribuições das fontes energéticas e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo produtivo de **OSB**.

FIGURA 21: EE PARA A PRODUÇÃO DE 1 m<sup>3</sup> DE OSB.

FONTE: A autora (2020).

FIGURA 22: EMISSÕES DE  $\text{CO}_2$  PARA A PRODUÇÃO DE  $1 \text{ m}^3$  DE OSB.

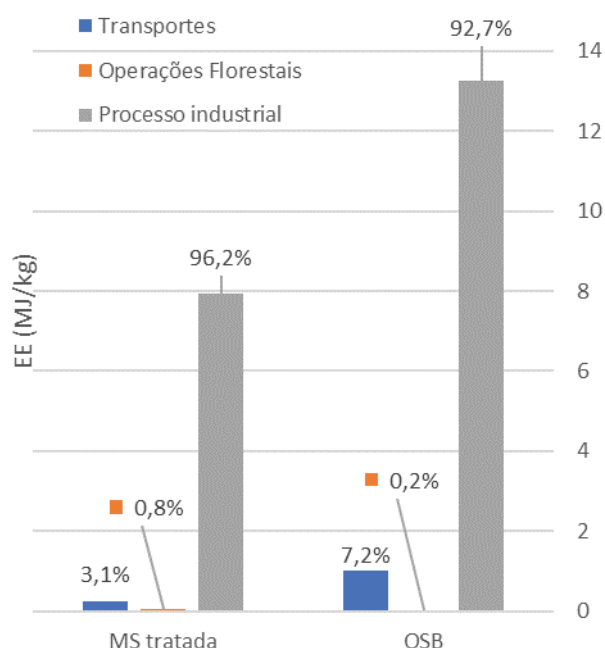
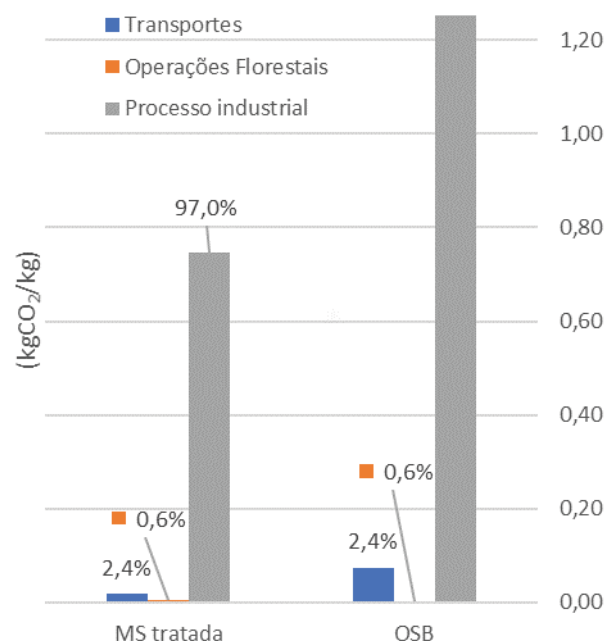
FONTE: A autora (2020).

A produção de **OSB** indica uma EE de  **$8589,46 \text{ MJ m}^{-3}$  ( $14,32 \text{ MJ kg}^{-1}$ )** associada a uma emissão de  $\text{CO}_2$  de  **$806,65 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-3}$  ( $1,34 \text{ kgCO}_2 \text{ kg}^{-1}$ )**. Analogamente à produção de madeira serrada, nota-se a predominância de fontes renováveis de energia no **processo produtivo do OSB**, também devido à utilização de energia de biomassa proveniente da queima de resíduos lenhosos, e esta geradora de emissões biogênicas de  $\text{CO}_2$ .

A resina MDI e a parafina representam, somadas, 4% da massa total do painel OSB, e observa-se na FIGURA 21 e na FIGURA 22 que os processos produtivos destes insumos prestam relevantes contribuições para a EE (10,7% e 4,1%, respectivamente) e emissões de  $\text{CO}_2$  (3,7% e 3,2%, respectivamente) associadas ao painel OSB. Isso nos traz evidências de que estes insumos trazem uma contribuição maior aos indicadores ambientais avaliados em proporção à sua participação em massa no painel, o que é coerente, ao passo que os recursos aplicados na produção desses insumos são quase totalmente provenientes fontes fósseis.

A FIGURA 23 e a FIGURA 24 apresentam as contribuições de cada fase dos processos envolvidos na produção dos materiais - madeira serrada tratada e OSB – no que tange a demanda de recursos energéticos e as emissões de  $\text{CO}_2$  a eles associadas.

FIGURA 23: EE NO PROCESSO PRODUTIVO DOS MATERIAIS.

FIGURA 24: EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DOS MATERIAIS

FONTE: A autora (2020).

Nota-se comportamento similar dos perfis produtivos da **madeira serrada tratada e do OSB**, sendo o **processo industrial de manufatura** dos materiais a fase mais relevante. Em relação às **operações florestais**, no escopo e recorte deste estudo, **a colheita** representa menos de 1% do consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> em ambos os processos, sendo quase irrelevante.

A baixa contribuição das operações florestais para os processos produtivos analisados nesta pesquisa é convergente com os resultados apontados por outros estudos, como Milota e Puettmann (2017), que sinalizam que a contribuição das operações florestais varia de 0 a 2% das emissões para a produção de madeira serrada de coníferas no noroeste e sudeste dos EUA; além de outros pesquisas que, analogamente, apontam baixa contribuição da fase florestal para a demanda energética da produção de OSB, como Puettmann e Wilson (2005), que indicam de demanda de 2% da fase de colheita florestal; Murphy, Devlin e McDonnell (2015), que apontam contribuição de 3% para a fase florestal e de transporte de toras; e Puettmann et al. (2013a), que apontam 2,4% da demanda associada à fase florestal.

Ainda, duas declarações ambientais de produto (EPDs) genéricas norte-americanas apresentam resultados de ACV para a produção de madeira serrada de coníferas e para a produção de OSB. Tais EPDs, AWC e CWC (2013a) e AWC e

CWC (2013b), apontam participação das Operações Florestais de 6% e 3% para a demanda energética na produção de madeira serrada de coníferas e de OSB, respectivamente. As mesmas EPDs, AWC e CWC (2013a) e AWC e CWC (2013b), apontam participação das Operações Florestais de 15% e 7% no que se refere ao indicador de Potencial de Aquecimento Global (GWP) na produção de madeira serrada de coníferas e de OSB, respectivamente. Nota-se que a contribuição das OF para os processos apontados nas EPDs para o GWP é proporcionalmente mais alta do que a quantificada na presente pesquisa para as emissões de CO<sub>2</sub>, contudo, deve-se notar que na categoria de impacto GWP são também contabilizados outros gases como CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, e estes expressos em CO<sub>2</sub>equivalentes, por meio de fatores de caracterização. Assim, apesar de trazer os resultados das EPDs como referência para comparação de resultados, não se pode fazer uma comparação direta, já que estas contabilizam fluxos não abordados no escopo da presente pesquisa.

Ressalta-se que as contribuições dos diferentes processos incluídos em um estudo de ACV são dependentes do escopo e fluxos analisados. Nesta dissertação foi tomado apenas um fabricante para caracterizar a produção dos materiais de madeira desejados, podendo ser esta uma limitação dos dados apresentados, já que as práticas de diferentes fabricantes podem trazer uma faixa de variação para os fluxos abordados. Ainda, as operações florestais para a produção de produtos florestais madeireiros pode seguir variados regimes de manejo, influenciando na contribuição por parte desse sistema.

O QUADRO 4 apresenta a compilação dos resultados obtidos no ARTIGO 3 para o processo de **montagem industrial de vedações verticais em WF** para o subsistema **SS2** avaliado.

QUADRO 4: EE e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo de montagem industrial de e 1 m<sup>2</sup> de vedação vertical interna e externa.

Subunidade de análise		EE (MJ m <sup>-2</sup> )				Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> )			
		Transportes		Processo		Transportes		Processo	
		Fóssil	Ren.	Fóssil	Ren.	Fóssil	Bio	Fóssil	Bio
SS2	Produção de VV externa	8,34	1,03	4,23	0,05	0,299	0,034	0,182	0,003
		9,37		4,28		0,333		0,185	
		13,65				0,518			
SS2	Produção de VV interna	8,17	1,00	4,14	0,05	0,293	0,033	0,178	0,003
		9,17		4,19		0,326		0,181	
		13,36				0,507			

FONTE: A autora (2020).

A FIGURA 25 e a FIGURA 26 apresentam as contribuições das fontes energéticas e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo de **montagem industrial de vedações verticais externas**. A avaliação da montagem de **VVs externas** indica uma EE de **13,65 MJ m<sup>-2</sup>** associada a uma emissão de CO<sub>2</sub> de **0,52 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>**.

FIGURA 25: EE PARA A MONTAGEM DE 1 M<sup>2</sup> DE VV EXTERNA.

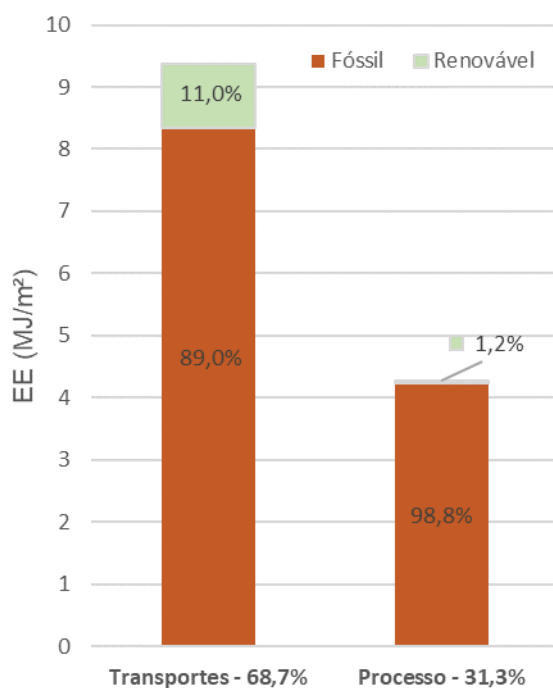
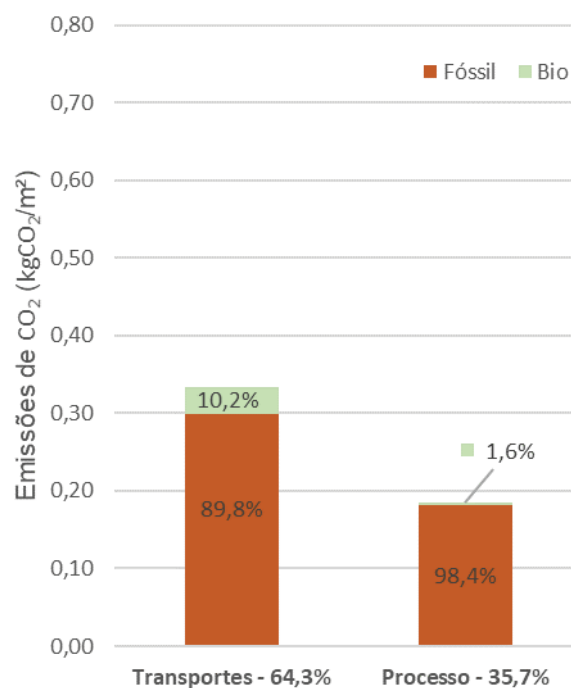
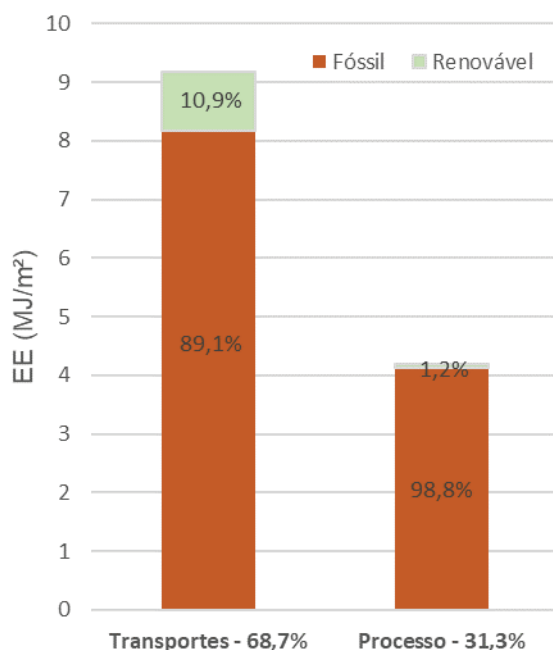
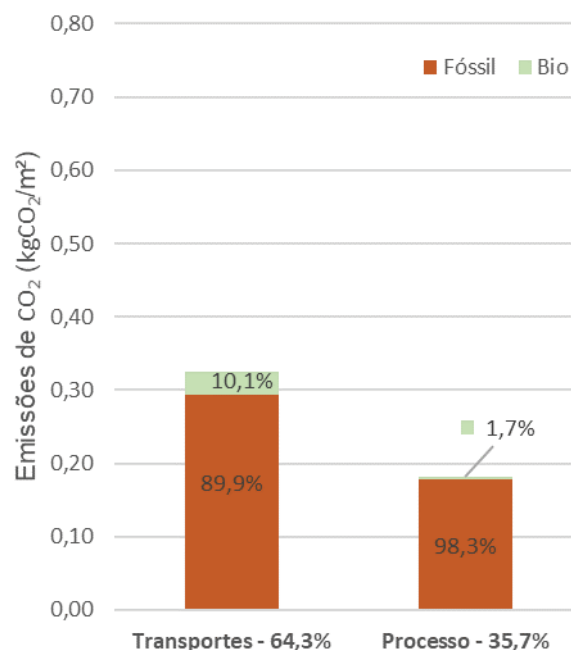


FIGURA 26: EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> PARA A MONTAGEM DE 1 M<sup>2</sup> DE VV EXTERNA.



FONTE: A autora (2020).

A FIGURA 27 e a FIGURA 28 apresentam resultados para o processo de **montagem industrial de vedações verticais internas**.

FIGURA 27: EE PARA A MONTAGEM DE 1 m<sup>2</sup> DE VV INTERNA.FIGURA 28: EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> PARA A MONTAGEM DE 1 m<sup>2</sup> DE VV INTERNA.

FONTE: A autora (2020).

A avaliação da montagem de **VVs internas** indica uma EE de **13,36 MJ m<sup>-2</sup>** associada a uma emissão de CO<sub>2</sub> de **0,50 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>**.

Ao contrário dos processos produtivos dos materiais de madeira, a contribuição dos **transportes** é importante, inclusive predominante, no subsistema de montagem das vedações verticais. Cerca de 70% da demanda energética e 80% das emissões de CO<sub>2</sub> associadas são oriundas dos transportes de matérias-primas envolvidos no processo. Esse resultado traz evidências de que o beneficiamento dos materiais no processo de montagem requer pouca energia em face aos esforços de transporte, o que pode ser interpretado de duas maneiras: umas delas é que o processo de montagem requer pouca energia, e a outra é que o fato de a parede ser composta de insumos variados leva a um aumento da contribuição dos transportes de matéria-prima para os indicadores avaliados.

## 7.1 COMPILAÇÃO DOS DADOS GERADOS PARA A COMPISIÇÃO DE VEDAÇÕES VERTICAIS

Finalmente, os quadros e figuras a seguir apresentam uma compilação dos resultados de todos os processos avaliados - produção de madeira serrada tratada; produção de OSB; e montagem industrial de vedações verticais internas e externas em WF – para a composição das vedações verticais em WF.

O QUADRO 5 apresenta os fluxos de referência<sup>2</sup> dos materiais - madeira serrada e OSB - em relação às unidades declaradas do subsistema de montagem das vedações verticais **1 m<sup>2</sup> de VV externa, 1 m<sup>2</sup> de VV interna**.

QUADRO 5: FLUXOS DE REFERÊNCIA DOS MATERIAIS DE MADEIRA EM RELAÇÃO ÀS UNIDADES DECLARADAS PARA O PROCESSO DE MONTAGEM DE VEDAÇÕES VERTICAIS.

Material lenhoso	Unidade declarada	
	1 m <sup>2</sup> de VV externa	1 m <sup>2</sup> de VV interna
MS tratada	0,018 m <sup>3</sup>	0,018 m <sup>3</sup>
OSB	1,521 m <sup>2</sup>	1,409 m <sup>2</sup>

FONTE: A autora (2020).

A partir destes fluxos de referência, os indicadores de desempenho ambiental de EE e emissão de CO<sub>2</sub> obtidos nos subsistemas SS0 e SS1 foram harmonizados para a composição de 1 m<sup>2</sup> de VV externa e interna.

#### 7.1.1 Vedação vertical externa

O QUADRO 6 apresenta os resultados obtidos de EE e emissão de CO<sub>2</sub> associados à fase A1-A3 da produção industrial de 1 m<sup>2</sup> de VV externa, **relativos à produtiva dos materiais de madeira nela contidos para o contexto brasileiro**. As quantidades de madeira serrada (0,018 m<sup>3</sup>) e OSB (1,521 m<sup>2</sup>) contidos na parede externa foram retiradas do inventário apresentado no ARTIGO 3.

QUADRO 6: EE E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE 1 m<sup>2</sup> DE **VV EXTERNA**.

Módulo	Subunidade de análise	EE (MJ m <sup>-2</sup> )				Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> )			
		Transportes		Processo		Transportes		Processo	
		Fóssil	Ren.	Fóssil	Ren.	Fóssil	Bio	Fóssil	Bio
A1-A3	MS tratada*	1,95	0,24	16,63	52,58	0,14	0,02	0,61	5,87
A1-A3	OSB	7,91	0,98	26,21	89,01	0,58	0,07	1,08	9,93
A1-A3	Montagem VV externa	8,34	1,03	4,23	0,05	0,30	0,03	0,18	0,003
TOTAL		18,20	2,25	47,07	141,65	1,02	0,12	1,87	15,81
		20,45 (10%)		188,72 (90%)		1,14 (6%)		17,68 (94%)	
		209,16				18,82			

FONTE: A autora (2020).

\*Assumindo densidade aparente a 15% de umidade de 480 kg m<sup>-3</sup> para *Pinus* (IPT, 2020).

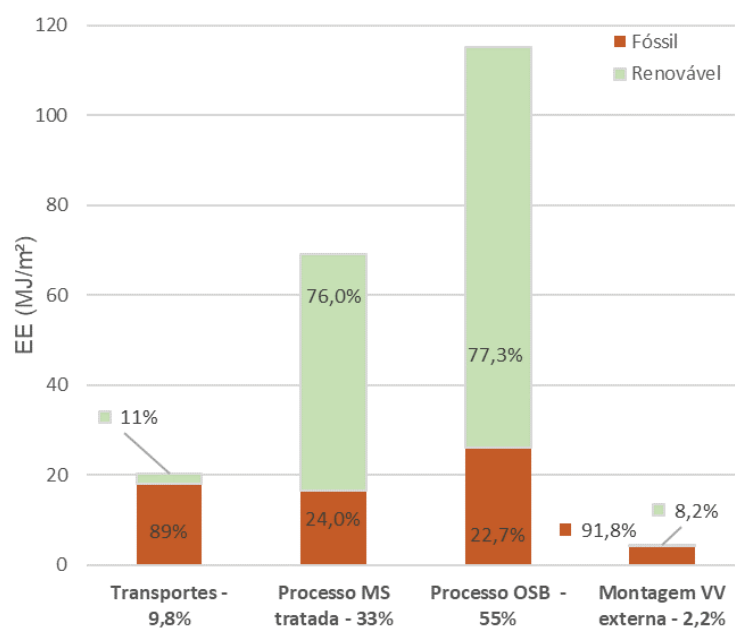
<sup>2</sup> Tais fluxos de referência se referem à entrada necessária de cada produto para a produção/montagem das VVs, e são oriundos do artigo 3 (CAPÍTULO 6).



A produção de 1m<sup>2</sup> de VV externa – incluindo os materiais de madeira nela contida - demanda uma EE de 209,49 MJ m<sup>-2</sup> associada a uma emissão de CO<sub>2</sub> de 18,82 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, sendo aproximadamente 90% das cargas atribuídas aos processos de beneficiamento avaliados e 10% ao transporte.

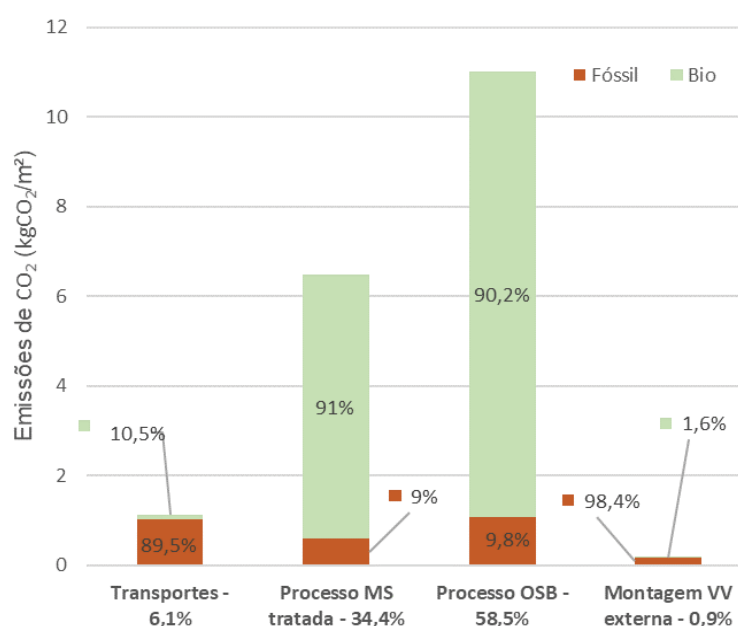
A FIGURA 29 e a FIGURA 30 apresentam as contribuições dos subsistemas avaliados em relação à produção da vedação vertical externa.

FIGURA 29: **EE PARA A PRODUÇÃO DE 1 M<sup>2</sup> DE VV EXTERNA.**



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 30: **EMISSIONES DE CO<sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE 1 m<sup>2</sup> DE VV EXTERNA.**



FONTE: A autora (2020).

### 7.1.2 Vedação vertical interna

O QUADRO 7 apresenta os resultados obtidos de EE e emissão de CO<sub>2</sub> associados à fase A1-A3 da produção industrial de 1 m<sup>2</sup> de VV interna, quanto à cadeia produtiva dos materiais de madeira nela contidos para o contexto brasileiro. As quantidades de madeira serrada (0,018 m<sup>3</sup>) e OSB (1,409 m<sup>2</sup>) contidos na parede externa foram retiradas do inventário apresentado no ARTIGO 3.

QUADRO 7: EE E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> PARA 1 m<sup>2</sup> DE **VV INTERNA**.

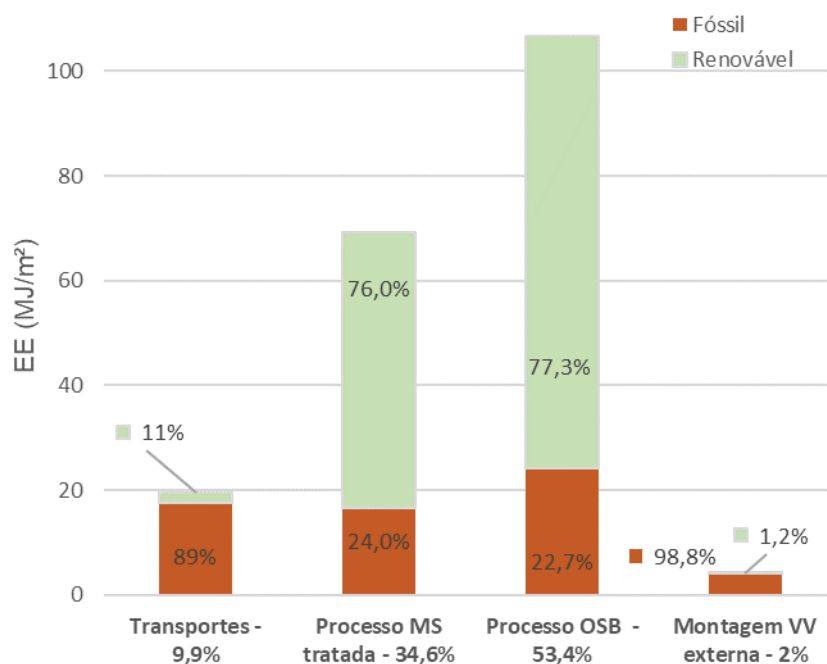
Módulo	Subunidade de análise	EE (MJ m <sup>-2</sup> )				Emissão de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> )			
		Transportes		Processo		Transportes		Processo	
		Fóssil	Ren.	Fóssil	Ren.	Fóssil	Bio	Fóssil	Bio
A1-A3	MS tratada*	1,95	0,24	16,63	52,58	0,14	0,02	0,61	5,87
A1-A3	OSB	7,33	0,91	24,28	82,46	0,54	0,06	1,00	9,20
A1-A3	Montagem VV interna	8,17	1,00	4,14	0,37	0,293	0,03	0,18	0,003
TOTAL		17,44	2,15	45,05	135,09	0,98	0,11	1,79	15,08
		19,59 (10%)		180,14 (90%)		1,08 (6%)		16,86 (94%)	
		199,73				17,95			

FONTE: A autora (2020).

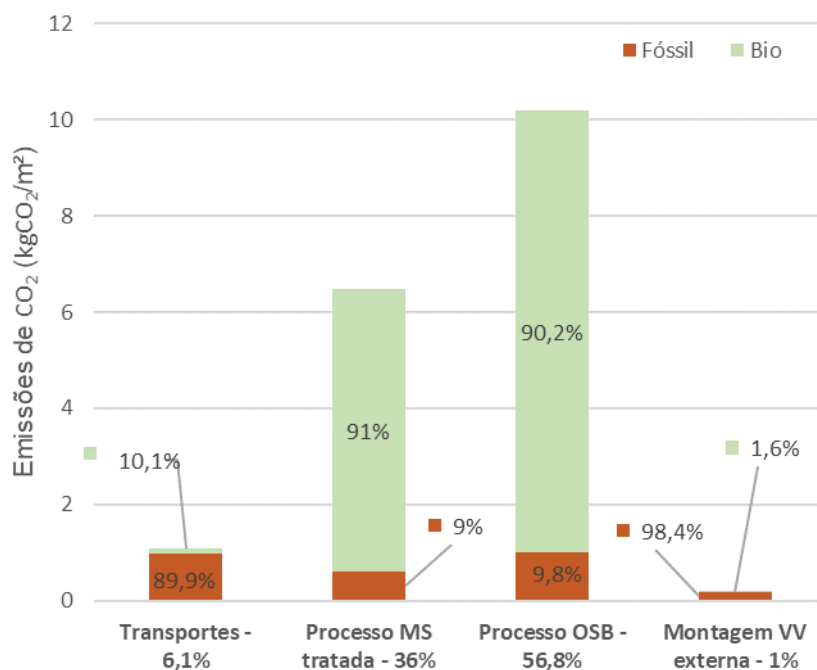
\*Assumindo densidade aparente a 15% de umidade de 480 kg m<sup>-3</sup> para *Pinus* (IPT, 2020).

A produção de 1m<sup>2</sup> de VV interna – incluindo os materiais de madeira nela contida - demanda uma EE de 200,05 MJ m<sup>-2</sup> associada a uma emissão de CO<sub>2</sub> de 17,95 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, sendo aproximadamente 90% das cargas atribuídas aos processos de beneficiamento avaliados e 10% ao transporte.

A FIGURA 31e a FIGURA 32 apresentam as contribuições dos subsistemas avaliados em relação à produção da vedação vertical interna.

FIGURA 31: EE PARA A PRODUÇÃO DE 1 M<sup>2</sup> DE **VV INTERNA**.

Fonte: A autora (2020).

FIGURA 32: EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> PARA A PRODUÇÃO DE 1 m<sup>2</sup> DE **VV INTERNA**.

Fonte: A autora (2020).

As quantidades de madeira serrada e OSB nas duas tipologias de VVs – interna e externa – são praticamente a mesmas. As diferenças são mínimas, e se devem principalmente à alocação por massa no processo de produção industrial de

VV (detalhada e discutida no ARTIGO 3). Dessa forma os resultados obtidos para as VVs são muito semelhantes, e nos levam a discussões similares.

Para ambas as tipologias, a contribuição dos **transportes é de aproximadamente 10%**, e **dos processos de 90%** para a EE e emissões de CO<sub>2</sub>.

Em ambas as tipologias de VV, o processo produtivo do OSB é o maior contribuinte para EE e emissões de CO<sub>2</sub> dentro do recorte avaliado ( $\approx 55\%$ ), seguido pela produção da madeira serrada tratada ( $\approx 35\%$ ), e pela montagem industrial das vedações verticais em WF ( $\approx 1-2\%$ ), e o restante associado aos transportes.

A montagem industrial de VVs em WF tem eletricidade, diesel, GLP e lubrificantes como fontes energéticas e, portanto, não contribui com cotas de energia renovável. Apesar disso, o consumo energético do subsistema de montagem de VVs em WF é muito baixo em relação aos demais (2,2%) para ambas as VVs.

Os processos mais contribuintes para a EE e emissões de CO<sub>2</sub> dentro do recorte avaliado – produção de OSB e de madeira serrada - têm participação predominante de energia renovável (de 70% a 80%), esta proveniente da queima de biomassa para produção de energia. Analogamente, as emissões de CO<sub>2</sub> biogênico são dominantes entre as emissões de CO<sub>2</sub> do processo avaliado.

Deve-se ressaltar que **não estão somados a esta emissão total de CO<sub>2</sub> as cargas referentes ao processo produtivo dos outros materiais envolvidos** na produção de uma VV em WF, sendo esta uma limitação deste estudo. No entanto, o objetivo desta pesquisa era apresentar dados característicos de processos produtivos brasileiros, estudando em maior detalhe a cadeia produtiva do material característico do sistema de produto estudado – a madeira. Este fato corrobora com **a opção por não incluir dados secundários de processos não característicos da nacionalidade**, o que poderia prejudicar a qualidade dos dados representativos da nacionalidade.

Ressalta-se ainda que, apesar de a empresa inventariada no processo de montagem de vedações verticais em WF ter uma composição característica das paredes que executa, o WF é um sistema versátil, que aceita variadas composições de acabamento interno e externo. Dessa forma, desejou-se nesta pesquisa contribuir com dados comuns ao sistema – observada a fronteira tecnológica - em detrimento à caracterização de um sistema de vedação vertical WF singular.

### 7.1.3 Balanço de carbono

A partir dos dados do ARTIGO 3, é possível quantificar o material lenhoso em 1 m<sup>2</sup> de vedação vertical interna e externa em WF, indicadas também em 7.1.1 (pág. 182) e 7.1.2 (pág. 184). Considerando-se os fatores padrão sugeridos pelo IPCC (2019c) para produtos semiacabados de madeira, e as massas de material lenhoso contido nas vedações verticais, estima-se a imobilização de CO<sub>2</sub> biogênico durante o ciclo de vida da edificação em que for empregada, a partir da seguinte equação:

$$\text{Imobilização de carbono biogênico em madeira} = 44/12 * TC * \text{massa seca de madeira}$$

Em que:

44 é a massa molar de dióxido de carbono;

12 é a massa molar de carbono;

É o teor de carbono no material lenhoso.

A partir disso, um m<sup>2</sup> de VV em WF pré-fabricada contém em média 14-15 kg de material lenhoso, madeira serrada e OSB - o que corresponde a aproximadamente 25-26 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> imobilizado (QUADRO 8).

QUADRO 8: CO<sub>2</sub> POTENCIALMENTE IMOBILIZADO EM HWP.

Vedação Vertical	Material lenhoso	Quantidade (kg)	Densidade (kg m <sup>-3</sup> )	Teor de carbono	C (kg)	CO <sub>2</sub> imobilizado (kgCO <sub>2</sub> )
Externa	Madeira serrada de coníferas	6,67	480 <sup>a</sup>	0.50 <sup>c</sup>	3,34	12,23
	OSB	7,98	600 <sup>b</sup>	0.463 <sup>c</sup>	3,70	13,55
Interna	Madeira serrada de coníferas	6,77	480 <sup>a</sup>	0.50 <sup>c</sup>	3,38	12,41
	OSB	7,41	600 <sup>b</sup>	0.463 <sup>c</sup>	3,43	12,58

Fonte: A autora (2020).

<sup>a</sup> IPT (2020)

<sup>b</sup> Ferro et al (2018)

<sup>c</sup> a partir de IPCC (2019c).

A soma das contribuições da produção dos materiais de madeira e a montagem industrial de VVs em WF (com dados harmonizados para 1 m<sup>2</sup> de parede) conta com emissão de 19,20 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> e 18,23 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>, para VVs externas e internas, respectivamente.

A FIGURA 33 e a FIGURA 34 ilustram o potencial balanço de carbono nas VVs, com base no nas informações de carbono imobilizado nos materiais de

madeira aplicados no sistema, bem como nas emissões de CO<sub>2</sub> estimadas no recorte deste estudo.

FIGURA 33: BALANÇO DE CARBONO PARA VV EXTERNA.

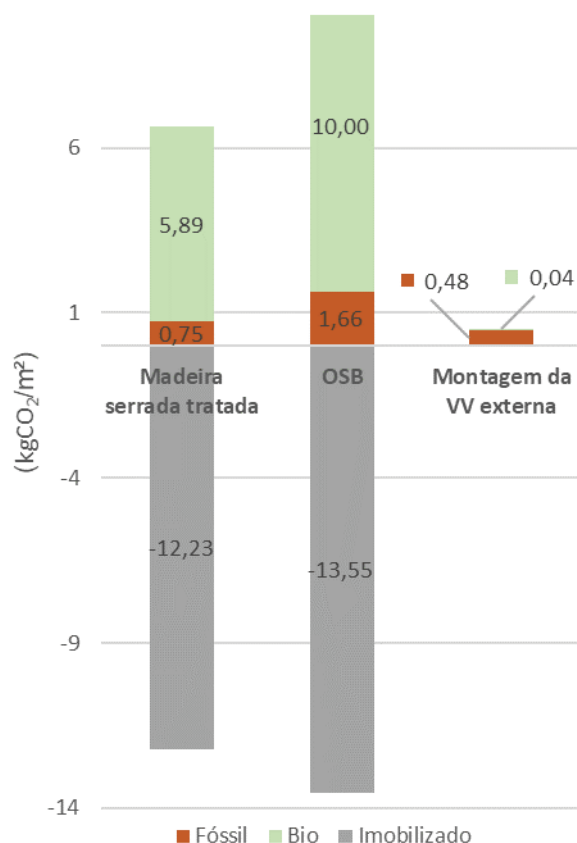
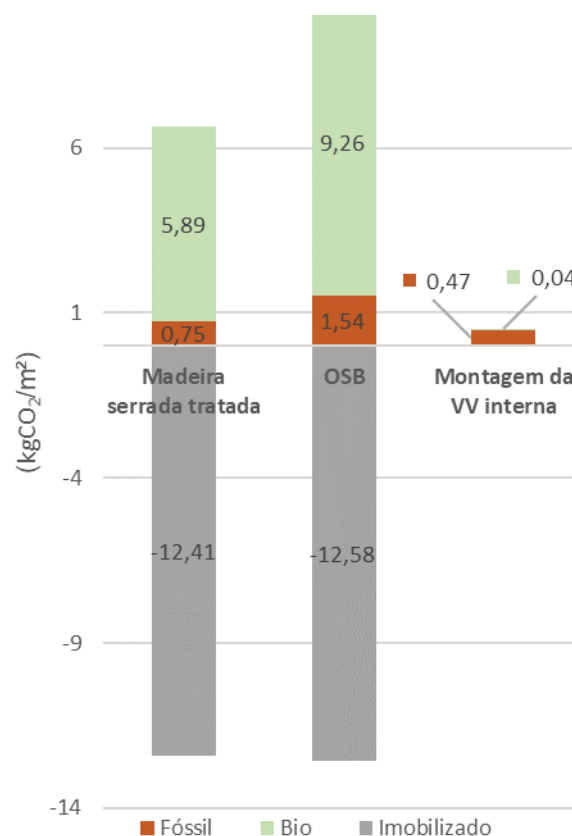


FIGURA 34: BALANÇO DE CARBONO PARA VV INTERNA.



FONTE: A autora (2020).

Este cenário traz evidências de que o beneficiamento dos materiais de madeira até a aplicação na parede traz um saldo negativo de emissões de CO<sub>2</sub> dentro do recorte estudado. Tal potencial de imobilização de carbono se mostra como uma vantagem ambiental do uso da madeira frente a urgente demanda de ação de combate às mudanças climáticas, questão que a CC tem parcela importante de responsabilidade, como já discutido neste trabalho.

Vale ressaltar que benefícios do estoque de carbono estão intimamente relacionados ao uso e vida útil dados aos materiais de madeira, bem como ao destino de fim-de-vida. Ainda, uma avaliação completa e mais aprofundada da dinâmica dos fluxos de carbono no ciclo de vida dos materiais seria necessária, a partir de cenários que poderiam ser gerados a partir das diretrizes do IPCC para *Harvested Wood Products*. Para tanto, entende-se que uma análise completa do

ciclo de vida da edificação seria necessária, inclusive abordando cenários de fim-de-vida para os materiais, e neste ponto, poderiam entrar discussões quanto à circularidade do sistema construtivo. Apesar de pertinentes e relevantes, tais discussões não são escopo deste trabalho – que se limitou à uma avaliação na fase de produto - sendo oportunidade para aprofundamento em trabalhos futuros.



## 8 CONCLUSÕES

A cadeia produtiva de materiais de madeira aplicados à montagem industrial de vedações verticais em WF é avaliada por meio de uma ACV simplificada, reportando indicadores de EE e emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos processos avaliados, afim de contribuir com a geração de dados nacionais da cadeia produtiva do sistema construtivo WF. Três subsistemas foram avaliados neste estudo – **produção de madeira serrada tratada, produção de OSB, e montagem industrial de vedações verticais em WF**.

Para a produção dos materiais de madeira, o processamento industrial da madeira é a fase mais contribuinte, seguido dos transportes e das operações florestais.

Considerando as fontes de dados tomadas e o recorte do estudo proposto, as **operações florestais** prestam baixa contribuição aos indicadores avaliados, 0,3% da EE e emissão de CO<sub>2</sub> associadas à produção de OSB, e 0,9% e 0,7% da EE e emissão de CO<sub>2</sub> associadas à produção de madeira serrada, respectivamente. A baixa contribuição das operações florestais para as cargas totais do processamento de materiais madeireiros pode ser devido ao alto rendimento de maquinário na colheita florestal, ainda que intensivo em consumo de combustíveis, bem como devido à alta demanda energética dos processos de beneficiamento dos materiais subsequentes.

Os resultados da EE e emissão de CO<sub>2</sub> associadas à **produção de OSB** obtidos neste estudo se mostraram muito semelhantes aos apresentados em outros estudos da literatura científica internacional. Contudo, mais de 70% da demanda energética do processo é suprida por fontes renováveis, principalmente biomassa de resíduos lenhosos, prestando contribuição muito superior em relação à participação de energias renováveis reportada em processos internacionais (da ordem 13 a 50% do uso de energia a partir de biomassa). Analogamente, mais de 90% das emissões de CO<sub>2</sub> estão associadas são de fontes biogênicas. Insumos auxiliares – como a parafina e resina MDI - prestam grande contribuição aos indicadores avaliados em função de sua participação em massa no painel.

A comparação dos resultados deste estudo para o processo de **produção de madeira serrada** com outros estudos internacionais traz evidências da heterogeneidade deste processo produtivo devido à grande variação de resultados

encontrados para os indicadores de interesse desta pesquisa. Na avaliação conduzida nesta dissertação, a **produção de madeira serrada tratada** conta com aproximadamente 75% da demanda energética suprida por fontes renováveis de energia, devido ao uso intenso de resíduos de biomassa. Analogamente, cerca de 90% do CO<sub>2</sub> no processo avaliado é de fonte biogênica.

A maior utilização de recursos energéticos de fonte renovável nos processos produtivos dos **materiais de madeira avaliados**, devido à utilização de energia de biomassa proveniente da queima de resíduos lenhosos pode ser um dos pontos principais de diferença dos processos brasileiros em relação aos processos internacionais, que em geral apresentam menor contribuição de emissões biogênicas oriundas dos recursos energéticos que abastecem os processos produtivos. Esse fato aponta para evidências de que os processos produtivos de materiais lenhosos brasileiros aplicam fontes de energia mais limpas. Portanto, o impacto da do mix energético utilizado nos processos é um ponto potencial de comparação entre a realidade nacional e processos característicos de outras coberturas geográficas, sendo este um fator que enfatiza a importância da continuidade de realização de estudos de ACVs e ICVs de produtos a nível regional, a fim de ir além de discussões sobre o desempenho dos processos quanto à EE e emissões de CO<sub>2</sub>, e incluir a origem dos recursos e emissões associadas – renováveis e fósseis.

Ao contrário da produção dos materiais de madeira, a demanda energética do processo de **montagem das vedações verticais em WF** é principalmente de fontes fósseis, devido ao uso predominante de eletricidade e GLP. A principal contribuição para a EE e emissões de CO<sub>2</sub> associadas a este processo é proveniente dos transportes, entre 60 e 70%. Nos demais processos avaliados – produção de OSB e de madeira serrada - os **transportes** da cadeia produtiva pouco contribuem para seus respectivos processos produtivos.

Dentro do escopo e fronteiras avaliadas nesta dissertação, das operações florestais à montagem das VVs em WF, o processo de **produção de OSB** é o maior contribuinte para EE e emissões de CO<sub>2</sub> dentre os avaliados (≈55%), seguindo da **produção da madeira serrada tratada** (≈35%), e **da montagem industrial da das vedações verticais em WF** (≈1-2%) - que se confirmou ser muito pouco significativa em comparação à demanda energética da produção dos materiais.

O **potencial carbono imobilizado nos materiais** de madeira se mostrou superior às potenciais emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos produtivos para o contexto brasileiro, resultando em um **balanço de carbono negativo** (apresentado no item 7.1.3), similarmente às discussões de processos internacionais. Vale ressaltar que não se encontram contabilizadas neste estudo as emissões associadas à produção de outros materiais envolvidos na produção das VVs em WF (ex: chapa de gesso, placa cimentícia, *sindings*, isolamento, membrana hidrófuga, entre outros).

Os resultados gerados nesta dissertação por si só não permitem inferir sobre o desempenho ambiental do sistema construtivo WF como um todo, sendo esta uma limitação desta pesquisa. Para tanto, seria necessário que os outros elementos necessários para promover a função de vedação da parede fossem agregados na análise. Contudo, o objetivo desta pesquisa era apresentar dados característicos de processos produtivos brasileiros, estudando em maior detalhe a cadeia produtiva do material característico do sistema de produto estudado – a madeira, e, portanto, optando-se por não incluir dados secundários de processos não característicos da nacionalidade. Apesar do exposto, entende-se que os dados gerados nessa dissertação contribuem com dados e informações que podem ser utilizadas em uma avaliação completa para o contexto nacional.

O fato de apenas um caso/ processo produtivo ter sido tomado para a caracterizar a produção dos materiais de madeira a partir da literatura técnica se configura como uma limitação dos dados apresentados neste estudo, principalmente para a produção de madeira serrada, que apresenta resultados muito heterogêneos nos estudos observados na literatura técnica internacional. Tal limitação é reiterada ao olhar para o subsistema de operações florestais, já que a produção produtos florestas madeireiros pode seguir variados regimes de manejo, influenciando na contribuição por parte desse sistema.

Para VV com características diferentes, os indicadores de EE e emissão de CO<sub>2</sub> podem diferir. O método aqui utilizado para obter e formalizar os resultados de desempenho ambiental é flexível para gerenciar estas peculiaridades, dessa forma, as orientações e percepções fornecidas neste trabalho podem ser úteis para a solução de problemas semelhantes.

## 8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados gerados nesta pesquisa contribuem com a caracterização do perfil ambiental de processos produtivos representativos da bioeconomia brasileira, fornecendo informações a respeito do WF e sua cadeia produtiva para a realidade nacional. Assim, esta pesquisa contribui com a geração de informação sobre um sistema construtivo em consolidação no Brasil, e podem ser utilizadas para dar continuidade à avaliação de seu desempenho ambiental.

A avaliação dos processos produtivos em subsistemas separados permitiu notar as contribuições de cada processo para a composição da vedação vertical para o escopo proposto, e ainda observar algumas especificidades dos processos da realidade nacional em relação aos descritos em estudos internacionais.

Em relação às estratégias tomadas nesta pesquisa, algumas delas não foram satisfatórias ou poderiam ser conduzidas de forma diferente em outros estudos. A escolha de apenas uma fonte de dados/ um fabricante para caracterizar a produção de madeira serrada se mostrou limitada, devido à heterogeneidade do setor percebida na comparação com a literatura técnica internacional, sendo interessante trabalhar os resultados em faixas de variação para a caracterização do perfil ambiental desse e de outros processos de materiais empregados na CC.

O fato de ter incluído apenas a cadeia produtiva dos materiais lenhosos na análise de vedações verticais em WF, apesar de se apoiar na justificativa de prezar por dados brasileiros na análise e gerar interessantes discussões sobre a cadeia produtiva do WF no contexto nacional, dificulta a aplicação direta dos dados gerados, sendo interessante a inclusão dos demais materiais que completam a função das VVs no sistema.

A inclusão de diferentes tipologias de projeto (ex: unifamiliar, multifamiliar) na análise da montagem industrial das vedações verticais a partir do conjunto de dados fornecido, dificultou o processamento de dados, bem como a interpretação das partes interessadas em relação ao dado gerado para a unidade declarada. Isso fez com que práticas aplicadas a apenas uma tipologia se distribuíssem na geração de um dado geral de VV interna e externa (ex: aplicação da chapa de gesso em obra ou na indústria). Recomenda-se a utilização de várias repetições de um projeto singular, ou então apenas uma tipologia para análises similares.

Ainda, apesar de entender como pertinente a discussão da imobilização de carbono nos materiais de madeira para fim duráveis, ao longo do desenvolvimento

deste trabalho, notou-se dificuldade de discorrer de forma aprofundada sobre esta importante característica de tais produtos, principalmente devido ao recorte da análise não incluir a fase de uso e final de vida. Nota-se, portanto, uma oportunidade de desenvolvimento de pesquisas futuras nesse contexto.

Finalmente, a fim de dar continuidade a esta dissertação, suprir as limitações encontradas ao longo do seu desenvolvimento e contribuir mais com aspectos com a geração de informação para o desenvolvimento da CC, sugere-se que os seguintes tópicos sejam trabalhados em pesquisas futuras:

- Avaliar os processos produtivos dos materiais lenhosos participantes da cadeia produtiva do WF a partir de dados primários, de modo a compor uma faixa de variação de resultados;
- Avaliar os processos produtivos dos outros materiais envolvidos na cadeia do sistema WF;
- Conduzir análise para os outros subsistemas de uma edificação WF (entrepisos, cobertura);
- Dar continuidade na análise incluindo a fase de obra para avaliar a demanda energética total da produção da edificação;
- Conduzir a análise para a demais fases do ciclo de vida das edificações – operacional, cenários de fim de vida;
- Análise mais aprofundada da dinâmica dos fluxos de carbono ao longo do ciclo de vida dos materiais de madeira aplicados nas edificações, incluindo a decomposição da madeira, e cenários de fim de vida da edificação, reuso dos materiais, disposição final, atrelados à dinâmica da produção florestal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento da Indústria. **Manual da construção industrializada: Conceitos e etapas - Volume 1: Estrutura e vedação**. Brasília: ABDI, 2015.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ABNT 2018. **Wood Frame Study Committee resumes activities**. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/noticias/5789comissao-de-estudos-de-wood-frame-retoma-atividades>. Acesso em 24 set 2018.

APA. The Engineered Wood Association. **Advanced Framing CAD Details**. APA CAD. 2016. Disponível em: <https://www.apawood.org/walls-cad-details>. Acesso em: 19 jun 2019.

ARAUJO, Victor Almeida de; CORTEZ-BARBOSA, Juliana; GARCIA, José Nivaldo; et al. Woodframe: light framing houses for developing countries. **Revista de la construcción**, Santiago, Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, v. 15, n. 2, p. 78-87, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-915x2016000200008> > DOI: 10.4067/s0718-915x2016000200008.

ASDRUBALI, F. et al. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. **Building and Environment**, v. 114, p.307-332, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>.

ATMACA, A; ATMACA, N. Life cycle energy (LCA) and carbon dioxide emissions (LCCO<sub>2</sub>A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 417-431, 2015.

AZEVEDO, Nathalia Cardoso de. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de CO<sub>2</sub> Através da Modelagem da Informação da Construção (BIM) e Simulação Termo Energética de uma Habitação Unifamiliar em Wood Frame**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil - PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

AWC - American Wood Council; American Forest & Paper Association (AF&PA) (EUA). **Details for Conventional Wood Frame Construction**. Washington. AWC. 2001. 52 p.

AWC e CWC - American Wood Council e Canadian Wood Council. **EPD of north American softwood lumber**. Registro: 13CA24184.102.1. 2013a Disponível em: <<https://www.awc.org/sus-tainability/epd>>. Acesso em: agosto, 2018.

AWC e CWC - American Wood Council e Canadian Wood Council. **EPD of north American oriented strand board**. Registro: 13CA24184.101.1. Emissão: 2013b. Disponível em: <<https://www.awc.org/sus-tainability/epd>>. Acesso em: agosto, 2018.

AWC – American Wood Council. **WFCM - Wood Frame Construction Manual for One- and Two-Family Dwellings**. 2015 Edition. 2014. Disponível em: <https://awc.org/codes-standards/publications/wfcm-2015>. 2014. Acesso em: 19 jun. 2019.

BENOÎT, Y.; PARADIS, T. 2007. **Construction de maisons à ossature bois**. Centre Technique du Bois et de l'Ámeublement (CTBA). Groupe Eyrolles.

BERGMAN, Richard et al. The carbon impacts of wood products. **Forest Products Journal**, USA, v. 64, n. 7, p.320-332, out. 2014.

BERGMAN, Richard D.; BOWE, Scott A. Environmental Impact of Manufacturing Softwood Lumber in Northeastern and North Central United States. **Wood and Fiber Science**, v. 42, p.67-78, fev. 2010.

BERGMAN, R. D.; KAESTNER, D.; TAYLOR, A. M. Life Cycle Impacts of North American Wood. **Wood and Fiber Science**, v. 48, p. 40–53. 2016.

BSRIA BG. **Embodied Carbon: ICE**. Universidade de Bath, 2011. Disponível em: <https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf> Acesso em: agosto de 2018.

BUCHANAN, Andrew H.; LEVINE, S. Bry. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. **Environmental Science and Policy**, n. 2, p. 427-437. 1999.

CASTRO, S. C. L. de **O uso da Madeira em construções habitacionais: a experiência do passado e a perspectiva de sustentabilidade no exemplo da arquitetura chilena**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CEN - **EN 15978**: Sustainability of Construction Works - Assessment of Environmental Performance of Buildings d Calculation Method. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2011.

CEN - **EN 15804**: Standards Publication Sustainability of Construction Worksd Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2014.



CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN/TC 350 - Sustainability of construction works**. Disponível em: <[https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0:::FSP\\_ORG\\_ID:481830&cs=181BD0E0E925FA84EC4B8BCCC284577F8](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0:::FSP_ORG_ID:481830&cs=181BD0E0E925FA84EC4B8BCCC284577F8)>. Acesso em: 20 jun. 2019.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, p.395-413, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>.

CIRCULAR ECOLOGY (Inglaterra). **Embodied energy and carbon - The ICE database**. Disponível em: <<http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.XQj0KlhKiUk>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

CMHC - Canadian Mortgage and Housing Corporation. **Wood-Frame House Construction**. Canada. 2013.

CORRIM - Consortium for Research on Renewable Industrial Materials. **Library of LCA's on Wood**. Disponível em: < <https://corrim.org/lcas-on-wood-products-library/> Acesso em: 20 Ago. 2020a.

CORRIM - Consortium for Research on Renewable Industrial Materials. History. Disponível em: <https://corrim.org/history/>. Acesso em: 20 Ago. 2020b.

ESPÍNDOLA, L. R. **Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade**. 2010. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ESPÍNDOLA, L. R. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. 2017. 331 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **FAOSTAT: Forestry Production and Trade**. 2018a. Disponível em:<<http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 03 jan 2019b.

FERRO, F. S. et al. Environmental aspects of oriented strand boards production: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 710-719, 2018.

FPL - FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. 2010.

FU, Feifei et al. Development of a Carbon Emission Calculations System for Optimizing Building Plan Based on the LCA Framework. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, p.1-13, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/653849>.

GARCIA, Katia Regina Punhagui. **Potencial de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera**. 2014. 422 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio Ambiente En La Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluna, Universidad Politécnica de Cataluna e Universidade de São Paulo, Barcelona, 2014.

GERVASIO, H. and DIMOVA, S., **Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings**, EUR 29123 EN, Publications Office of the European Union, 2018, ISBN 978-92-79-79973-0, doi:10.2760/10016, JRC110082.

GIESEKAM, J.; BARRETT, J.; TAYLOR, P.; OWEN, A. The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. **Energy & Buildings**, v. 78, p. 202–214, 2014. Elsevier B.V. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.035>>.

GLOVER, J.; WHITE, D. O.; LANGRISH, T. A. G. Wood versus concrete and steel in house construction. **Journal of Forestry**, v. 100, n. 8, p. 34–41, 2002. Bethesda: Society of American Foresters. Disponível em: <<https://search.proquest.com/docview/220825949?accountid=146694>>.

GONG, X.; NIE, Z.; WANG, Z.; et al. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing: A comparative study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 4, p. 576–587, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84865334739&doi=10.1111%2Fj.1530-9290.2011.00415.x&partnerID=40&md5=cde8f894cde725f9b07ba99571ea976e>>.

GONZÁLEZ-GARCÍA, Sara et al. Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 4, p.432-443, 2 fev. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0384-0>.

GUIA QUALIDATA: **Requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida**. Elaborado por Thiago Oliveira Rodrigues, et al. – Brasília: IBICT, 2016.

GUSTAVSSON, L. et al. Capítulo 3: Fundamentals: greenhouse gas and primary energy balances over a building life cycle. In: AUTHORS., CEI-Bois e autores. **Wood in carbon efficient construction: Tools, methods and applications**. Bruxelas: CEI-Bois, 2013. p. 24-32.

GUSTAVSSON, Leif; PINGOUD, Kim; SATHRE, Roger. Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete and wood-framed buildings. Mitigation and Adaptation. **Strategies for Global Change**, n.11, p. 667-691. 2006.

GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Embodied energy and CO<sub>2</sub> emission of wood- and concrete-framed buildings in Sweden. **2nd World Conference on Biomass for Energy**, Industry and Climate Protection, Italy, 2004.

HAFNER, Annette; RUETER, Sebastian. Method for Assessing the National Implications of Environmental Impacts from Timber Buildings - An Exemplary Study for Residential Buildings in Germany. **Wood and Fiber Science**, [s.l.], v. 50, p.139-154, 13 ago. 2018. Society of Wood Science and Technology. <http://dx.doi.org/10.22382/wfs-2018-047>.

HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon and Energy - ICE: Embodied energy and carbon - The ICE database - version 3.0**. Universidade de Bath, 2019. Disponível em: <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. Acesso em: agosto de 2020.

HEYWOOD, Huw. **101 Regras Básicas para Edifícios e Cidades Sustentáveis**. 1: Gustavo Gilli. 2017.

HILGENBERG NETO, M. F. **Estudo de viabilidade técnico/econômica da casa de madeira popular no Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores; PÖYRY Consultoria em Gestão e Negócios Ltda. **Relatório 2017**. 2017. Disponível em: <<http://iba.org/pt/>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

IBGE. **Estatísticas do século XX**: Estatísticas populacionais, sociais, políticas e culturais. Habitação e infra-estrutura. Prédios - por tipo de material da cobertura, segundo a situação do domicílio e o material das paredes e do piso — 1970. Disponível em: <<https://seculoxx.ibge.gov.br/en/populacionais-sociais-politicas-e-culturais/busca-por-palavra-chave/habitacao-e-infra-estrutura/741-predio.html>>. Acesso em: 15 maio 2018.

IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNAD Contínua**: Características gerais dos domicílios e dos moradores. 2017a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/habitacao/17270-pnad-continua.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 15 maio 2018.

IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua**: Características gerais dos domicílios e dos moradores. 2017b. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101566\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101566_informativo.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2018.

IDDON, Christopher R.; FIRTH, Steven K. Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 67, p.479-488, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.041>.

IEA - International Energy Agency. **Transition to sustainable buildings**. Paris, 2013.

IMMERGRUN Construções Inteligentes. 2019. Disponível em: <<https://immergrun.com.br/#quemsomos>>. Acesso em: 16 jun. 2019.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Volume 4** - Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2006a.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC - 2019 Refinement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Volume 0** - Overview. 2019b.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC - 2019 Refinement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Volume 1** - General Guidance and Reporting. 2019b.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC - 2019 Refinement to the 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Volume 4** - Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2019c.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. São Paulo, 2003. 60 p.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Informações sobre madeiras**. Disponível em: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=7](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7). Acesso em: Mai 2020.

KLINE, D. E. Gate-to-gate life-cycle inventory of oriented strandboard production. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 74–84, 2005. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-32644461614&partnerID=40&md5=00ce03e23364ec30759ff9afcf13666>>.

LAMLOM, S.H.; SAVIDGE, R.A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, n. 4, p.381-388, out. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0961-9534\(03\)00033-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0961-9534(03)00033-3).

LAWSON, R. Mark; OGDEN, Ray G.; BERGIN, Rory. Application of modular construction in high-rise buildings. **Journal of architectural engineering**, v. 18, n. 2, p. 148-154, 2011.

LEITNER, Drielle Sanchez. **Avaliação de Desempenho em Edificação de Interesse Social em *Light Wood Frame*: Estudo de Caso na Região Metropolitana de Curitiba com Avaliação Pré-Ocupação do Desempenho Térmico, Acústico, Lumínico e Qualidade do Ar**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil - PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

LIPPKE, Bruce et al. CORRIM: Life-cycle Environmental Performance of Renewable Building Materials. **Forest Products**, v. 54, n. 6, jun. 2004.

LIPPKE, Bruce et al. Characterizing the Importance of Carbon Stored in Wood Products. **Wood and Fiber Science**, v. 42, p.5-14, 2010.

LIPPKE, Bruce et al. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. **Future Science**, v. 2, n. 3, p.303-333, Jun, 2011.

LOVELL, H.; SMITH, S. J. Agencement in housing markets: The case of the UK construction industry. **Geoforum**, v. 41, n. 3, p. 457–468, 2010. Elsevier Ltd. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.11.015>>.

MALESZA, Jarosław; MIEDZIAŁOWSKI, Czesław. Current Directions in Development of Modern Wood-framed Houses. **Procedia Engineering**, v. 172, p.701-705, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.084>.

MAO, C.; SHEN, Q.; SHEN, L.; TANG, L. Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. **Energy & Buildings**, v. 66, p. 165–176, 2013. Elsevier B.V.<<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.033>>.

MARKO, R. **Estudo da Abrainc/FGV projeta demanda habitacional até 2027**. Disponível em: <<https://sindusconsp.com.br/estudo-da-abraincfgv-projeta-demanda-habitacional-ate-2027/>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2019.

MEIL, Jamie; WILSON, Jim; O'CONNOR, Jennifer; DANGERFIELD, Jim. An assessment of wood product processing technology advancements between the CORRIM I and II studies. **Forest Products Journal**. p. 83-89. ago. 2007.

MILOTA, M. R.; WEST, C. D.; HARTLEY, I. D. Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood lumber production. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 47–57, 2005. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-32644486263&partnerID=40&md5=348954c9e2d79046e600dd93d3948105>>.

MOLINA, Julio Cesar; CALIL JUNIOR, Carlito. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Exact and Technological Sciences**. Londrina, p. 143-156. dez. 2010. Available at: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/viewFile/4017/6906>>. Accessed on 24 Sep. 2018.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema wood frame no estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MUNARO, M R et al. Proposal of a building material passport and its application feasibility to the wood frame constructive system in Brazil. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 225, p.1-18, 24 fev. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012018>.

NHBC. **Housing Market Report**. Nº 298. 2017. 31 p. Disponível em: <[https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707\\_Housing-Market-Report\\_Jul17.pdf](https://www.britishprecast.org/Precast/media/BPMediaLibrary/Publications/201707_Housing-Market-Report_Jul17.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2019.

O'BRIEN, M. J. Hybrids on the Way to the Western Platform Frame: Two Structures in Western Virginia. **Preservation Education and Research**, v.3, p. 37-52, 2010.

O'CONNOR, Jennifer; BOWICK, Matt. Advancing sustainable design with life cycle assessment. **Sustainable Architecture & Building Magazine**, set. 2014. Disponível em: <<http://www.athenasmi.org/resources/publications/>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

O'CONNOR, Jennifer; BOWICK, Matt. **Embodied Carbon of Buildings: International Policy Review**. Vancouver, B.C. Canada: Athena Sustainable Materials Institute, 2016. Disponível em: <[http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2016/09/Embodied\\_Carbon\\_Policy\\_Review\\_August\\_2016.pdf](http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2016/09/Embodied_Carbon_Policy_Review_August_2016.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2018.

OLIVEIRA, Eloise de. **Contribuição para Análise do Ciclo de Vida no Ambiente Construído Visando a Energia e o CO<sub>2</sub> Embutidos no Sistema Construtivo Wood Frame**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PAWELZIK, P. et al. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 23, p.211-228, fev. 2013.



PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. Sistema Nacional de Avaliação Técnica - SINAT. Sistema Nacional de Avaliação Técnica. **Diretriz SiNAT nº 005 – Revisão 2** – Diretriz para Avaliação Técnica de Produtos – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas – Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”. Brasília: Ministério das Cidades, 2017. Disponível em: <[http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos\\_sinat.php](http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php)>. Acesso em: 16 jun. 2019.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **DATec nº 020-C** – Sistema Construtivo em peças leves de madeira serrada – TECVERDE: Tipo light wood frame. Brasília: Ministério das Cidades, 2018.

PEREZ-GARCIA, J.; LIPPKE, B.; BRIGGS, D.; WILSON, J.; BOWYER, J.; MEIL, J. 2005. The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction. **Wood and Fiber Science**. v. 3.p. 3–17.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico** - 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PUETTMANN, M. et al. **Cradle to gate life cycle assessment of oriented strand board production from the southeast**. CORRIM – Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, 2013a.

PUETTMANN, M. et al. **Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Softwood Lumber Production from the Pacific Northwest**. CORRIM – Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, 2013b.

PUETTMANN, M. E.; WAGNER, F. G.; JOHNSON, L. Life cycle inventory of softwood lumber from the inland northwest us. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. SUPPL. 1, p. 52–66, 2010. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77950278563&partnerID=40&md5=b12a1e93ca68a99fda00051e239f5cd8>>.

QWEB – Quebec Wood Export Bureau (2019) **Environmental Product declaration for prefabricated light wood frame open wall**. CSA Group. 20 p.

RAMAGE, Michael H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p.333-359, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.

RAMOS, Valéria Mayumi Kushima. **Avaliação do Ciclo de Vida dos Materiais de Uma Habitação de Interesse Social dm Alvenaria Convencional, Light Steel Framing e Light Wood Framing**. 2019. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil - PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.



ROBSON, Colin. **Real World Research**: a resource for social scientists and practitioner - researchers. 2 ed. Malden, USA: Blackwell Publishing. 599 p. 2002.

SATHRE, R.; GUSTAVSSON, L. Time-dependent radiative forcing effects of forest fertilization and biomass substitution. **Biogeochemistry**. v.109. n.1-3. p. 203-218. 2012.

SILVA, Bárbara Alpendre da. **Superfícies em madeira e qualidade do ar: um estudo sobre os produtos e tratamentos associados ao uso da madeira no ambiente construído e as práticas de especificação dos arquitetos paranaenses**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012a.

SILVA, L. P. **Análise do Ciclo de Vida Energético de habitações de interesse social**. 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012b.

SILVA, Samuel Alves da et al. Teores de carbonomédios para compartimentos e espécies florestais. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, dez. 2014.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. D. P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 309–326, 2018.

TAKANO, A. et al. Capítulo 4: Carbon footprint calculation methodology: Building level. In: AUTHORS., CEI-Bois e autores. **Wood in carbon efficient construction**: Tools, methods and applications. Bruxelas: CEI-Bois, 2013. p. 33-59.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise de Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. 225 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. **Consumo de energia para construção, operação e manutenção das edificações residenciais no Brasil**. ENCAC – ENLAC Maceió, p. 2037-2045, 2005.

THALLON, R. **Graphic guide to Frame Construction**. 3 ed. Newtown: The Taunton Press, 2008.

TREOLAR, G.J. et al. Building materials selection: greenhouse strategies for built facilities. **Facilities**, vol. 19, p. 139-149. Emerald, Bradford. UK, 2001.

UNEP. **The 10 Year Framework of Programmes on Sustainable Buildings and Construction**. Disponível em: <<http://www.scpclearinghouse.org/sites/default/files/10yfp-sbc-brochure-en.pdf>>. 2016. Acesso em: 16 jan. 2019.

UNEP. **Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers**. Paris: UNEP SBCI, 2009. Disponível em: <[https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/buildings\\_and\\_climate\\_change.pdf](https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/buildings_and_climate_change.pdf)>. 2016. Acesso em: 09 jun 2019.

WERNER, Frank; RICHTER, Klaus. Wooden building products in comparative LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 7, p.470-479, 17 abr. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.04.317>.

WILSON, James B.; SAKIMOTO, Eric T. Gate-to-Gate Life-Cycle Inventory of Softwood Plywood Production. **Wood and Fiber Science: CORRIM Special Issue**. v. 37. p. 58-73. dez. 2005.

YIN, Robert. **Estudo de caso - planejamento e métodos**. 2 ed. Porto Alegre, Bookman, 200p. 2001.